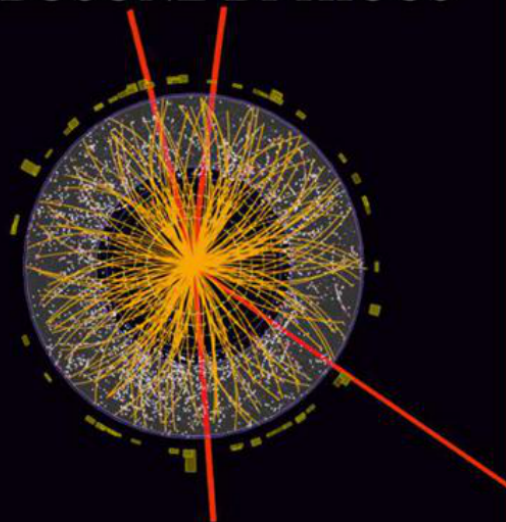


Adelphi eBook

Jim Baggott

IL BOSONE DI HIGGS



ADELPHI

LADRI DI BIBLIOTECHE



Indice

Frontespizio

Colophon

Prefazione

Premessa - di Stephen Weinberg

IL BOSONE DI HIGGS

PROLOGO - Forma e sostanza

PARTE PRIMA - L'invenzione

1 - La poesia della logica

2 - Un po' debole, come scusa

3 - Non ti seguiranno in molti

4 - Idee giuste applicate al problema sbagliato

5 - So come fare

PARTE SECONDA - La scoperta

6 - Correnti neutre alternate

7 - Devono essere W

8 - Lancia lungo

9 - Un momento fantastico

10 - L'amletico dilemma

EPILOGO - La costruzione della massa

Note

Glossario

Bibliografia

Nota del curatore

Indice analitico

Jim Baggott

IL BOSONE DI HIGGS
L'INVENZIONE E LA SCOPERTA
DELLA «PARTICELLA DI DIO»

Prefazione di Steven Weinberg
A cura di Franco Ligabue



Adelphi eBook

Higgs
The Invention and Discovery of the ‘God Particle’

Si ringrazia per la preziosa collaborazione
Giovanni Zevi Della Porta - Harvard University

ATLAS Group

Quest’opera è protetta
dalla legge sul diritto d’autore
È vietata ogni duplicazione,
anche parziale, non autorizzata

La traduzione dell’opera è stata realizzata
grazie al contributo del SEPS - SEGRETARIATO
EUROPEO PER LE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE



Via Val d'Aposa 7 – 40123 Bologna
seps@seps.it - www.seps.it

In copertina: Ricostruzione di un evento interpretabile come decadimento di un bosone di Higgs in due coppie di muoni (marcati in rosso). L'evento è stato registrato dal rivelatore ATLAS il 10 giugno 2012.

© CERN, GINEVRA

Prima edizione digitale 2013

© 2013 ADELPHI EDIZIONI S.P.A. MILANO
www.adelphi.it

ISBN 978-88-459-7378-9

PREFAZIONE

Il 4 luglio 2012 la notizia che al CERN di Ginevra era stato scoperto qualcosa di molto simile al bosone di Higgs si diffuse immediatamente in tutto il mondo come un virus informatico altamente contagioso. Trionfo della fisica delle alte energie, titolavano con enfasi i giornali. Ripresa da radio e televisioni, la notizia raggiunse in breve miliardi di persone. Finalmente, dopo quarantotto anni – e molti miliardi di euro –, erano stati trovati segnali compatibili con una particella ipotizzata o «inventata» nel 1964.

Come mai tutto questo fermento? Che cos'è il bosone di Higgs, e perché è tanto importante? Se la nuova particella è davvero l'Higgs, che cosa ci dice sul mondo materiale e sull'evoluzione dell'universo nei suoi primi istanti? È davvero valsa la pena compiere tutti questi sforzi per scoprirla?

La risposta a questi interrogativi si trova nella storia del cosiddetto Modello Standard delle particelle elementari, cioè lo schema usato dai fisici per interpretare i costituenti elementari di cui è formata la materia e le forze che la tengono insieme o ne provocano la disintegrazione. Risultato cumulativo di decenni di lavoro, esso rappresenta il miglior tentativo di interpretare il mondo che ci circonda.

Il Modello Standard non è ancora una «teoria del tutto». Non spiega la forza di gravità. Negli ultimi anni si è molto parlato di nuove teorie esotiche, come la supersimmetria o le superstringhe, che cercano di unificare tutte le forze fondamentali, compresa la gravità. Nonostante l'impegno dei numerosi fisici teorici che vi lavorano, esse rimangono al momento ipotetiche e hanno pochissime evidenze sperimentali, se non nessuna. Per ora, pur con i limiti che gli sono stati riconosciuti fin dalla sua nascita all'inizio degli anni Settanta, il Modello Standard rimane il teatro in cui si svolge la maggior parte dell'azione.

Il bosone di Higgs è importante nel Modello Standard perché implica l'esistenza di un campo di energia altrimenti invisibile – il campo di Higgs, appunto – che pervade l'intero universo. Senza il campo di Higgs le particelle elementari di cui siamo fatti voi, io e l'intero universo osservabile sarebbero prive di massa. Senza il campo di Higgs la massa non potrebbe formarsi e non potrebbe esserci alcunché.

Sembra dunque che dobbiamo parecchio all'esistenza di questo campo. Ecco uno dei motivi per cui il bosone di Higgs, particella associata al campo di Higgs, viene chiamata nella stampa divulgativa

«particella di Dio». Amata dai giornalisti scientifici e dagli autori di libri divulgativi, l'espressione è invisa ai ricercatori, perché enfatizza troppo l'importanza della particella e sposta l'attenzione sul rapporto spesso difficile tra scienza e teologia.

Molte delle conseguenze dell'esistenza del campo di Higgs previste dalla teoria erano state verificate dagli esperimenti con i collisori di particelle nei primi anni Ottanta. Ma dedurre l'esistenza del campo non è la stessa cosa che rivelare la leggendaria particella ad esso associata. È quindi assai rassicurante sapere che molto probabilmente il campo esiste ed è davvero ovunque. La possibilità che il bosone non si trovasse era concreta, e le conseguenze che la sua scoperta avrebbe avuto sul Modello Standard erano potenzialmente devastanti.

Cominciai a scrivere questo libro nel giugno del 2010, due anni prima della scoperta. Ne avevo appena terminato un altro intitolato *The Quantum Story: A History in 40 Moments*, una storia della fisica quantistica dal 1900 ai giorni nostri che parla anche del Modello Standard e dell'invenzione del campo di Higgs con la relativa particella. Qualche mese prima il Large Hadron Collider (LHC) del CERN aveva ottenuto collisioni protone-protone all'energia record di 7000 miliardi di elettronvolt, e io avevo scritto che *forse* si sarebbe giunti a una scoperta nel giro di pochi anni. Fortunatamente i fatti mi hanno dato ragione.

The Quantum Story è uscito nel febbraio del 2011; questo nuovo libro prende le mosse da lì.

Devo ringraziare Latha Menon e la Oxford University Press, che hanno accettato il rischio di commissionare un volume su una particella non ancora scoperta. Ho seguito gli sviluppi al CERN attraverso i canali ufficiali, ma devo riconoscere il mio debito verso un certo numero di fisici delle alte energie, tra cui Philip Gibbs, Tommaso Dorigo, Peter Woit, Adam Falkowski, Matt Strassler e Jon Butterworth. Grazie anche a Jon Butterworth, Sophie Tesauri, James Gillies, Laurette Ponce e Lyndon Evans per aver trovato il tempo di parlare con me e farmi partecipe del crescente senso di eccitazione. Vorrei anche esprimere la mia gratitudine ai professori David Miller e Peter Woit, che hanno letto e fatto le loro osservazioni sulle prime bozze, e al professor Steven Weinberg, il quale oltre a leggere le bozze è stato così gentile da contribuire con il suo personale punto di vista nella Premessa. Di qualunque errore rimasto la responsabilità è interamente mia.

Reading, 6 luglio 2012

PREMESSA
di Steven Weinberg

Molte scoperte scientifiche importanti sono state seguite da libri divulgativi che le illustravano al vasto pubblico. Questo è invece il primo caso che io sappia di un libro scritto in gran parte *prima* di una scoperta ritenuta imminente. Il fatto che fosse pronto per la pubblicazione all'indomani del suo annuncio da parte del CERN, nel luglio 2012, testimonia la notevole determinazione e intraprendenza di Jim Baggott e della Oxford University Press.

La pubblicazione tempestiva è anche segno del diffuso interesse per l'argomento. Può dunque essere di qualche utilità aggiungere in questa sede alcune osservazioni personali. Spesso si dice che nella ricerca dell'Higgs fosse in gioco l'origine della massa. C'è del vero, ma l'affermazione va precisata meglio.

A partire dagli anni Ottanta avevamo a disposizione una buona teoria, relativamente completa, di tutte le particelle elementari osservate e delle forze che queste esercitano le une sulle altre (esclusa la gravità). Uno degli elementi essenziali di tale teoria è la simmetria – una sorta di parentela – tra due di queste forze: l'elettromagnetismo e la forza nucleare debole. L'elettromagnetismo è responsabile della luce; la forza nucleare debole permette alle particelle dei nuclei atomici di cambiare identità nei decadimenti radioattivi. Questa simmetria unisce le due forze in un'unica struttura «elettrodebole». Le caratteristiche generali della teoria elettrodebole sono state abbondantemente verificate: non è certo la loro validità che veniva messa in discussione nei recenti esperimenti al CERN e al Fermilab, ed essa non sarebbe stata seriamente inficiata nemmeno se la particella di Higgs non fosse stata trovata.

Tuttavia, una delle conseguenze della simmetria elettrodebole è che, se non si aggiungono altri ingredienti alla teoria, tutte le particelle elementari, compresi gli elettroni e i quark, risultano prive di massa, e questo è palesemente falso. Dunque è necessario aggiungere qualcosa di nuovo alla teoria, qualche nuovo tipo di materia o di campo, non ancora osservati in natura o in laboratorio. La ricerca della particella di Higgs era la ricerca di una risposta alla domanda: «Che cos'è questo qualcosa di nuovo?».

Cercare qualcosa di nuovo non significava, in questo caso, limitarsi a trafficare con gli acceleratori aspettando di vedere che cosa saltasse fuori. In qualche modo la simmetria elettrodebole, una proprietà esatta delle equazioni fondamentali alla base della fisica delle

particelle, doveva essere rotta: in altre parole, essa non è direttamente applicabile alle particelle e alle forze che osserviamo nella realtà. Fin dagli studi di Yoichiro Nambu e di Jeffrey Goldstone nel 1960-61 era noto che una rottura di simmetria di questo genere è possibile in diverse teorie; tuttavia, ciò sembrava implicare di necessità nuove particelle prive di massa, che invece, si sapeva, non esistevano.

Furono gli studi indipendenti di Robert Brout e François Englert; Peter Higgs; Gerald Guralnik; Carl Hagen e Tom Kibble, tutti del 1964, a dimostrare che in alcune teorie questi bosoni di Nambu-Goldstone senza massa sparivano, andando invece a dare massa alle particelle mediatrici di forza (per brevità d'ora in avanti citerò questi studi come «gli articoli del 1964»). È quel che accade nella teoria delle forze deboli ed elettromagnetiche proposta da Abdus Salam e da me nel 1967-68. Quale tipo di materia o di campo rompe la simmetria elettrodebole?

C'erano due possibilità. La prima era l'esistenza di campi finora mai osservati che pervadono il vuoto e che, come il campo magnetico terrestre distingue il nord dalle altre direzioni, distinguono la forza debole da quella elettromagnetica, dando massa alle particelle mediatrici della forza debole e ad altre particelle ma lasciando senza massa i fotoni (i mediatori della forza elettromagnetica). Questi campi sono detti «scalari» perché, diversamente dal campo magnetico, non individuano alcuna direzione nello spazio ordinario. Campi scalari generici di questo tipo furono introdotti negli esempi illustrativi di rottura di simmetria usati da Goldstone, e in seguito negli articoli del 1964.

Quando Salam e io utilizzammo questo tipo di rottura di simmetria per elaborare la moderna teoria «elettrodebole» delle interazioni elettromagnetiche e deboli, ipotizzammo che la rottura fosse dovuta a campi scalari del tipo descritto, pervasivi di tutto lo spazio. (Una simmetria di questo genere era già stata ipotizzata da Sheldon Glashow, Salam e John Ward, ma non come proprietà esatta delle equazioni della teoria, e per questa ragione essi non furono indotti a introdurre campi scalari).

Una delle conseguenze delle teorie in cui le simmetrie sono rotte da campi scalari (compresi i modelli presi in considerazione da Goldstone e dagli articoli del 1964, nonché la teoria elettrodebole mia e di Salam) è che, sebbene alcuni di questi campi servano solo per dare massa alle particelle mediatrici di forza, altri campi si sarebbero manifestati in natura come particelle fisiche, osservabili negli acceleratori e nei collisori di particelle. Tre di questi campi scalari furono utilizzati per dar massa alle particelle W_+ , W_- e Z_0 , i «fotoni pesanti» che nella nostra teoria trasportano la forza debole (scoperti al CERN nel 1983-84, con la massa predetta dalla teoria elettrodebole).

Rimaneva fuori un quarto campo scalare, il quale si sarebbe manifestato come particella fisica, un addensamento di energia e quantità di moto del campo stesso: la «particella di Higgs», appunto, quella che i fisici sono andati cercando per circa trent'anni.

Ma c'era sempre una seconda possibilità. Poteva non esistere alcun nuovo campo scalare onnipervasivo, né alcuna particella di Higgs. La simmetria poteva essere rotta da forze forti, dette forze «technicolour», agenti su particelle di tipo nuovo, mai osservate finora perché troppo pesanti. Qualcosa di simile accade con la superconduttività. Una teoria delle particelle elementari di questo genere, come quella proposta alla fine degli anni Settanta da Leonard Susskind e da me, porterebbe a una nuova miriade di particelle elementari tenute insieme dalle forze technicolour. Questa dunque l'alternativa che avevamo di fronte: campi scalari o technicolour?

La scoperta della nuova particella rappresenta un forte punto a favore dei campi scalari come origine della rottura di simmetria, e a sfavore delle forze technicolour. Ecco perché è importante.

Rimane però ancora molto da fare. La teoria elettrodebole del 1967-68 prevedeva tutte le proprietà della particella di Higgs, eccetto la sua massa. Ora che la massa è nota sperimentalmente, possiamo calcolare le probabilità di tutti i modi di decadimento della particella, e vedere se le predizioni saranno confermate da ulteriori esperimenti. Per questo ci vorrà un po' di tempo.

La scoperta di una nuova particella che ha tutta l'aria di essere quella di Higgs lascia anche ai teorici un compito difficile, quello di spiegarne la massa. Il bosone di Higgs è infatti l'unica particella la cui massa non nasce dalla rottura della simmetria elettrodebole: dal punto di vista dei principi di base della teoria elettrodebole, la massa dell'Higgs può avere qualunque valore. È per questo che né io né Salam siamo riusciti a predirla.

In effetti c'è un punto enigmatico riguardo alla massa del bosone di Higgs che è stato osservato, noto come «problema della gerarchia». Poiché è la massa dell'Higgs a definire la scala di massa delle altre particelle elementari note, ci si potrebbe aspettare che il suo valore sia dell'ordine di un'altra massa che ha un ruolo fondamentale in fisica: la cosiddetta massa di Planck, ossia l'unità fondamentale di massa nella teoria della gravità (è la massa di ipotetiche particelle la cui mutua attrazione gravitazionale sarebbe uguale in intensità a quella tra due elettroni posti alla stessa distanza). Ma la massa di Planck è circa cento milioni di miliardi di volte più grande di quella dell'Higgs. Quindi, anche se il bosone di Higgs è talmente pesante da aver richiesto la costruzione di un collisore gigantesco per produrlo, la domanda che ci dobbiamo porre è: perché ha una massa così piccola?

Jim Baggott mi ha chiesto di esprimere un punto di vista personale sull'evoluzione delle idee in quest'ambito. Mi soffermerò solo su due punti.

Come racconta l'autore nel capitolo 4, già prima del 1964 Philip Anderson sostenne che la rottura di simmetria non implicava necessariamente bosoni di Nambu-Goldstone privi di massa. Per quale motivo io e altri fisici teorici non rimanemmo convinti dalle sue argomentazioni? Non certo perché non consideravamo Anderson degno di essere preso sul serio: di tutti i teorici che si occupavano di fisica della materia condensata, nessuno meglio di lui aveva visto con chiarezza il ruolo fondamentale dei principi di simmetria, principi che si sono rivelati della massima importanza in fisica delle particelle.

Credo che l'argomentazione di Anderson sia stata poco considerata perché si fondava su analogie con fenomeni, come la superconduttività, che non sono relativistici (ossia si verificano in ambiti nei quali la relatività speciale può essere tranquillamente trascurata), mentre l'inevitabilità dei bosoni di Nambu-Goldstone privi di massa era stata dimostrata in maniera apparentemente rigorosa da Goldstone, Salam e da me nel 1962, con un ragionamento che si fondava sulla validità manifesta della teoria della relatività. I teorici delle particelle erano disposti a credere che Anderson avesse ragione nel contesto non relativistico della superconduttività, ma non in quello della teoria delle particelle elementari, che incorpora necessariamente la relatività. Gli articoli del 1964 misero in chiaro che la dimostrazione di Goldstone, Salam e Weinberg non si applicava alle teorie quantistiche con mediatori di forza perché, sebbene i fenomeni fisici descritti da quelle teorie soddisfino il principio di relatività, lo stesso non vale per la formulazione matematica delle medesime teorie nel contesto della meccanica quantistica.

Questo problema con la relatività spiega anche perché dopo il 1967 non fui in grado, nonostante strenui sforzi, di dimostrare ciò che io e Salam avevamo congetturato, ovvero che gli infiniti privi di senso che comparivano nella teoria elettrodebole si sarebbero cancellati, proprio come era stato dimostrato per la teoria quantistica dell'elettromagnetismo. La relatività era stata essenziale nel dimostrare la cancellazione degli infiniti in elettromagnetismo. La dimostrazione trovata da Gerard 't Hooft nel 1971, descritta da Baggott nel capitolo 5, impiegava tecniche sviluppate da 't Hooft assieme a Martinus Veltman, in cui i principi della meccanica quantistica vengono adattati in modo da permettere una formulazione della teoria compatibile con la relatività.

Un secondo punto: nel capitolo 4 Baggott sostiene che nel mio articolo del 1967, in cui proponevo la teoria elettrodebole, non inclusi

i quark perché ero preoccupato dalla possibilità che la teoria prevedesse processi non ancora osservati riguardanti le cosiddette particelle «strane». Magari le mie motivazioni fossero state così specifiche! In realtà non inclusi i quark nella teoria semplicemente perché nel 1967 non credevo nei quark. Nessuno aveva mai osservato un quark, ed era difficile credere che fosse perché i quark erano molto più pesanti di particelle osservate come il protone e il neutrone, dal momento che ne erano i presunti costituenti.

Al pari di molti altri teorici, accettai pienamente l'esistenza dei quark solo dopo gli articoli del 1973 di David Gross e Frank Wilczek, e di David Politzer. Essi dimostravano che, nella teoria dei quark e delle forze nucleari forti nota come cromodinamica quantistica, la forza forte si indebolisce al diminuire della distanza. Ad alcuni di noi allora venne in mente che, se le cose stavano così, la forza forte tra quark sarebbe anche aumentata all'aumentare della distanza, forse fino al punto da impedire di separare i quark gli uni dagli altri. Sebbene manchi tuttora una dimostrazione di questo, oggi tutti ne sono convinti. La cromodinamica quantistica è ormai una teoria ben verificata, anche se nessuno ha mai visto un quark isolato.

Mi ha fatto molto piacere constatare che il volume prende le mosse dai primi del Novecento con Emmy Noether, la quale prima di chiunque altro si rese conto dell'importanza dei principi di simmetria in natura. Questo ci aiuta a ricordare che il lavoro degli scienziati di oggi è solo l'ultimo passo di una grande tradizione, fatta di intuizioni sul funzionamento della natura che vanno sempre sottoposte al vaglio dell'esperimento. Il libro di Jim Baggott dovrebbe riuscire a far assaporare al lettore questa storica avventura.

6 luglio 2012

IL BOSONE DI HIGGS

Per Ange

PROLOGO
FORMA E SOSTANZA

Di che cosa è fatto il mondo?

Domande semplici come questa stuzzicano il nostro intelletto da quando l'umanità è capace di pensiero razionale. Certo, oggi ci poniamo l'interrogativo in modo molto più elaborato e raffinato, e ottenere le risposte è assai più complesso e costoso. Ma la domanda di fondo rimane molto semplice.

Duemilacinquecento anni fa tutto ciò che i filosofi greci avevano a disposizione per indagare il mondo circostante era il senso della bellezza e dell'armonia della natura, unito alla potenza del ragionamento logico e all'immaginazione, applicati alle cose percepite con i meri cinque sensi. Visto in retrospettiva, è davvero straordinario quanto siano riusciti a capire.

I Greci furono attenti a distinguere tra forma e sostanza. Il mondo è fatto di sostanza materiale, la quale può assumere una moltitudine di forme diverse. Empedocle, filosofo siciliano del quinto secolo a.C., ipotizzò che questa varietà si potesse ridurre a quattro forme di base, che oggi chiamiamo «elementi»: terra, acqua, aria e fuoco. Questi elementi erano considerati eterni e indistruttibili; legati insieme in combinazioni romantiche dalla forza attrattiva dell'Amore e separati dalla forza repulsiva dell'Odio, essi davano origine a tutto ciò che esiste nel mondo.

Un'altra scuola di pensiero, fondata sempre nel quinto secolo a.C. da Leucippo e associata in particolare al suo discepolo Democrito, riteneva che il mondo consistesse di minuscole particelle di materia indivisibili e indistruttibili, dette atomi, e di spazio vuoto. Gli atomi rappresentavano i mattoni primari di qualunque sostanza ed erano quindi alla base di tutta la materia. Gli atomi erano necessari per una questione di principio, sosteneva Leucippo, dato che la sostanza non si poteva certo suddividere indefinitamente. Se così fosse, infatti, sarebbe possibile ridurre la materia al nulla, in palese contraddizione con la legge, che allora sembrava inoppugnabile, della conservazione della materia.

Circa un secolo dopo, Platone sviluppò una teoria che spiega come gli atomi (la sostanza) si organizzino per formare i quattro elementi (la forma). Ciascuno dei quattro elementi è rappresentato da un solido geometrico (o «platonico»); come è illustrato nel *Timeo*, le facce di ciascun solido si possono ulteriormente scomporre in sistemi di triangoli, che rappresentano gli atomi di cui sono costituiti gli

elementi. Riorganizzando la configurazione dei triangoli – quindi degli atomi –, è possibile trasformare un elemento in un altro e combinare gli elementi producendo nuove forme.¹

Sembra logico che debbano esistere dei costituenti ultimi, una qualche realtà incontrovertibile che sta alla base del mondo attorno a noi e gli dà forma. Se la materia fosse infinitamente divisibile raggiungeremmo un punto in cui gli stessi costituenti diventano piuttosto effimeri, fino al punto della non esistenza. Non ci sarebbero allora mattoni primari e ci rimarrebbero mere interazioni tra fantasmi indefinibili e inconsistenti che creano solo l'*apparenza* della sostanza.

Per quanto difficile da digerire, questo è in larga misura proprio ciò che ha dimostrato la fisica moderna. Oggi siamo convinti che la massa non sia una proprietà intrinseca o «primaria» dei costituenti fondamentali della natura. In pratica, la massa non esiste: essa è dovuta interamente all'energia delle interazioni che coinvolgono particelle elementari che per loro natura ne sono prive.

I fisici hanno continuato a dividere, e alla fine non hanno trovato niente.

Solo all'inizio del Seicento, con lo sviluppo di una filosofia sperimentale formale, divenne possibile andare oltre il pensiero speculativo che caratterizzava le teorie degli antichi Greci. La vecchia filosofia aveva cercato di intuire la natura della materia muovendo da osservazioni contaminate da pregiudizi su come *dovrebbe* esser fatto il mondo. I nuovi scienziati ora armeggiavano con la natura stessa alla ricerca di indizi su come sia *davvero* fatto il mondo.

Gli interrogativi vertevano ancora perlopiù sulla natura della forma e della sostanza. Il concetto di massa – una misura della *quantità* di materia, che si manifesta nel moto dinamico degli oggetti – assunse un'importanza centrale per la nostra concezione di sostanza. La resistenza di un oggetto all'accelerazione è interpretata come massa inerziale: colpito con la stessa forza, un oggetto piccolo accelera molto più di uno grande.

La capacità di un oggetto di generare un campo gravitazionale è interpretata come massa gravitazionale. La forza di gravità generata dalla Luna è più debole di quella generata dalla Terra, perché la Luna è più piccola e quindi ha una massa gravitazionale inferiore. La massa gravitazionale e quella inerziale sono empiricamente identiche, ma dal punto di vista teorico non vi è alcuna ragione evidente per cui debbano esserlo.

Gli scienziati svelarono anche il segreto della grande varietà di forme presente in natura. L'acqua, uno degli «elementi» fondamentali dei Greci, si rivelò costituita non da solidi regolari a facce triangolari

come aveva ipotizzato Platone, ma da molecole composte da atomi degli elementi chimici idrogeno e ossigeno, in una combinazione che oggi indichiamo con H_2O .

Questo uso più moderno della parola «atomo» inizialmente evocava l'interpretazione datane dai Greci, quella di costituente indivisibile della materia. Nel 1897, tuttavia, mentre ancora l'esistenza stessa dell'atomo era oggetto di grande dibattito, il fisico inglese Joseph John Thomson scopriva l'elettrone, particella con carica elettrica negativa. Evidentemente, gli atomi erano a loro volta costituiti da parti subatomiche.

La scoperta di Thomson fu seguita negli anni 1909-11 da esperimenti, condotti nei laboratori di Manchester dal neozelandese Ernest Rutherford, che mostravano come gli atomi consistano per la maggior parte di spazio vuoto. Al centro dell'atomo si trova un minuscolo nucleo di carica positiva, attorno al quale orbitano elettroni, come pianeti intorno a un sole. La maggior parte della massa degli atomi che costituiscono gli elementi della materia è concentrata nei nuclei atomici. È dunque nel nucleo che forma e sostanza confluiscono.

Questo modello «planetario» dell'atomo rimane ancor oggi una metafora molto efficace sul piano visivo. Ma fu subito chiaro ai fisici dell'epoca che un modello simile in realtà non ha senso: atomi di quel tipo sarebbero intrinsecamente instabili. A differenza dei pianeti in orbita attorno al Sole, infatti, le particelle cariche in moto in un campo elettrico irradiano energia sotto forma di onde elettromagnetiche. Eventuali elettroni «planetari» esaurirebbero la propria energia nel giro di una frazione di secondo, e l'architettura interna dell'atomo crollerebbe.

La soluzione di questo rompicapo emerse all'inizio degli anni Venti con la nascita della meccanica quantistica. L'elettrone non è solo una particella – che possiamo visualizzare come una minuscola pallina di materia elettricamente carica –, ma è allo stesso tempo onda e particella. Non è «qui» o «là», come ci si può aspettare da un pezzetto di materia localizzata, ma letteralmente «dappertutto» entro i confini di quell'ectoplasma delocalizzato che è la sua funzione d'onda. Gli elettroni non orbitano intorno al nucleo in senso letterale. Le loro funzioni d'onda formano caratteristiche strutture tridimensionali – che chiamiamo «orbitali» – nello spazio circostante il nucleo. La formula matematica di un orbitale è legata alla *probabilità* di trovare il misteriosissimo elettrone in un dato punto – «qui» o «là» – all'interno dell'atomo (fig. 1).

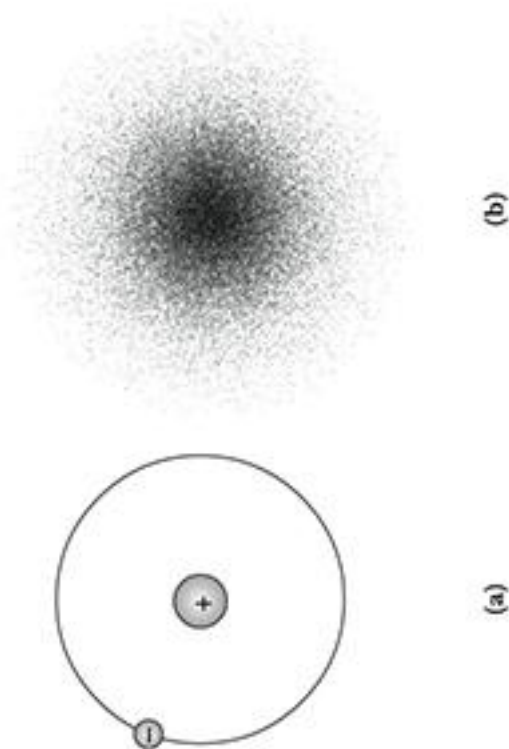
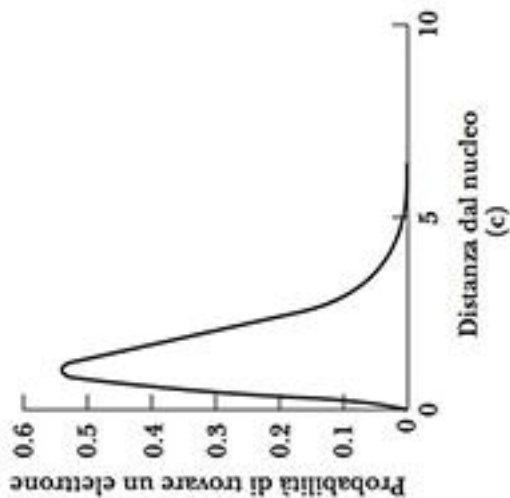


Figura 1 a) Modello planetario di Rutherford dell'atomo di idrogeno, in cui un solo elettrone di carica negativa occupa un'orbita fissa attorno a un nucleo, consistente in un solo protone di carica positiva. b) La meccanica quantistica sostituì l'elettrone in orbita con una funzione d'onda, che nella configurazione di minima energia (1s) è a simmetria sferica. c) L'elettrone si può ora «trovare» ovunque entro i confini della funzione d'onda, anche se la distanza a cui si trova con maggior probabilità è quella predetta dal vecchio modello planetario.

Quello della rivoluzione quantistica fu un periodo di inedita fertilità per la fisica, sia teorica sia sperimentale. Quando, nel 1927, il fisico inglese Paul Dirac combinò la meccanica quantistica con la teoria speciale della relatività di Albert Einstein, fece la sua comparsa una nuova proprietà dell'elettrone, chiamata *spin*. Era una proprietà già nota agli sperimentali, e interpretata inizialmente in termini di rotazione dell'elettrone, simile a quella di una trottola attorno al suo asse e a quella della Terra che ruota su sé stessa mentre orbita attorno al Sole (fig. 2).

Ma anche questa era una metafora visiva che, si scoprì ben presto, non aveva fondamento nella realtà. Oggi interpretiamo lo spin dell'elettrone come un effetto quantistico puramente «relativistico», nel quale l'elettrone può assumere una di due possibili «orientazioni» che chiamiamo spin-su e spin-giù. Non si tratta di orientazioni lungo particolari direzioni nello spazio tridimensionale convenzionale, ma di orientazioni in uno speciale «spazio di spin» che ha solo due dimensioni: su e giù.

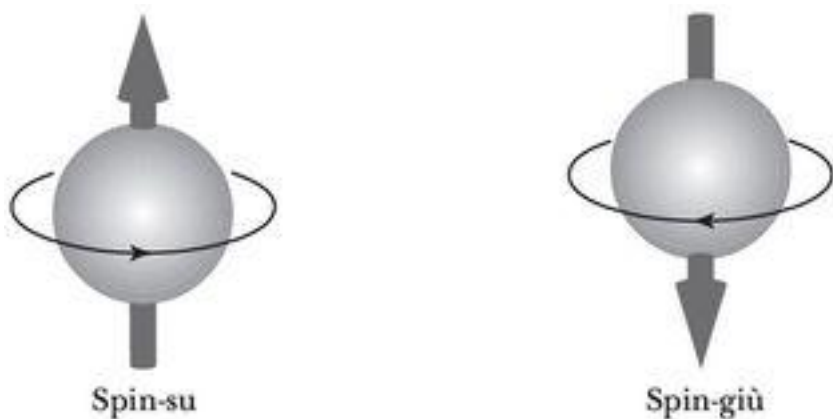


Figura 2 Nel 1927 Dirac combinò la meccanica quantistica con la relatività speciale, creando una teoria quantistica pienamente relativistica. Fece la sua comparsa la proprietà dell'elettrone chiamata *spin*, immaginata come se l'elettrone, di carica elettrica negativa, ruotasse letteralmente su sé stesso generando un piccolo campo magnetico locale. Oggi pensiamo allo spin semplicemente in termini delle sue possibili orientazioni: «su» e «giù».

Si scoprì che ogni orbitale atomico conteneva al più due elettroni. È il famoso *principio di esclusione* elaborato da Wolfgang Pauli nel 1925, secondo il quale lo stesso stato quantistico non può essere occupato da più di un elettrone. Il principio discende dalla forma matematica della funzione d'onda per un sistema formato da due o più elettroni. Se lo stato composto in cui si trova il sistema fosse creato a partire da due elettroni che hanno esattamente le stesse caratteristiche, la funzione d'onda avrebbe ampiezza nulla – uno stato simile non potrebbe cioè

esistere. Affinché esista una funzione d'onda di ampiezza non nulla, i due elettroni devono essere diversi sotto qualche aspetto. In un orbitale atomico questo significa che uno dei due deve avere lo spin verso l'alto e l'altro verso il basso. In altri termini, i due spin devono essere *accoppiati*.

È saggio resistere alla tentazione di visualizzare in qualche modo queste due diverse orientazioni. Il loro effetto è tuttavia reale. Lo spin determina l'entità del momento angolare dell'elettrone – la grandezza fisica associata al suo moto rotazionale – e governa il modo in cui esso interagisce con un campo magnetico esterno; entrambi gli effetti si possono studiare in dettaglio in laboratorio. Ma a quanto pare in meccanica quantistica viene superato il discrimine tra ciò che è dato e ciò che non è dato conoscere dell'origine di tali effetti.

La teoria quantistica relativistica dell'elettrone formulata da Dirac forniva inoltre il doppio delle soluzioni rispetto a quelle che il fisico si attendeva. Due di esse corrispondevano alle orientazioni (su e giù) dello spin dell'elettrone. E le altre due? Dirac aveva qualche idea al riguardo, ma nel 1931 finì con l'ammettere che dovevano rappresentare le due orientazioni di spin di un elettrone positivo fino ad allora sconosciuto. Dirac aveva scoperto l'antimateria. Il «positrone», l'antiparticella dell'elettrone, fu in seguito rilevato negli esperimenti sui raggi cosmici, originati da collisioni di particelle di alta energia con gli strati alti dell'atmosfera terrestre.

Nel 1932 sembrò che si fosse trovato l'ultimo pezzo del mosaico. Il fisico inglese James Chadwick scoprì il neutrone, una particella elettricamente neutra che risiede nel nucleo atomico accanto al protone. Sembrava che i fisici avessero ora tutti gli ingredienti per dare una risposta definitiva alla nostra domanda iniziale.

La risposta era pressappoco questa: tutta la materia è fatta di elementi chimici; tali elementi esistono in una grande varietà di forme possibili, rappresentate nella tavola periodica: dal più leggero, l'idrogeno, al più pesante rintracciabile in natura, l'uranio.²

Ogni elemento consiste di atomi. Ogni atomo consiste di un nucleo composto da un numero variabile di protoni, carichi positivamente, e di neutroni. Ogni elemento è caratterizzato dal numero di protoni presenti nel nucleo dei suoi atomi. L'idrogeno ne ha uno, l'elio due, il litio tre, e così via fino all'uranio, che ne ha 92.

Attorno al nucleo si trovano gli elettroni, di carica negativa, in numero tale da bilanciare il numero di protoni e rendere globalmente neutro l'atomo. Ogni elettrone può assumere un'orientazione dello spin verso l'alto o verso il basso e ogni orbitale può ospitare fino a due elettroni, a patto che i loro spin siano opposti.

È una risposta molto esauriente. Con protoni, neutroni ed elettroni come mattoni fondamentali, uniti al principio di esclusione di Pauli,

possiamo spiegare perché la tavola periodica ha la struttura che conosciamo. Possiamo spiegare perché la materia ha una forma e una densità. Possiamo spiegare l'esistenza degli isotopi – atomi con lo stesso numero di protoni ma con un numero diverso di neutroni nel nucleo. Con un po' di fatica possiamo spiegare tutta la chimica, la biochimica e la scienza dei materiali.

In questa descrizione, la massa non è un mistero. La massa di ogni sostanza si può ricondurre a quella dei suoi protoni e neutroni costituenti, responsabili di circa il 99 per cento della massa di ogni atomo.

Immaginiamo un cubetto di ghiaccio di 2,7 centimetri di lato ottenuto da acqua distillata. Prendiamolo in mano. È freddo e scivoloso. Non è pesante, ma nel palmo della mano sentiamo che un peso ce l'ha. Dove risiede dunque la massa del cubetto?

Il *peso molecolare* dell'acqua si calcola semplicemente dal numero totale di protoni e neutroni presenti nei nuclei dei due atomi di idrogeno, più uno di ossigeno, che formano la molecola H_2O . Il nucleo di ciascun atomo di idrogeno consiste solo di un protone, mentre quello dell'atomo di ossigeno contiene otto protoni e otto neutroni, per un totale di diciotto «nucleoni». Il cubo di acqua che teniamo in mano peserà circa 18 grammi,³ cioè un numero di grammi uguale al peso molecolare. Il cubetto consiste dunque di una quantità di acqua solida pari alla misura standard nota come «mole».

Sappiamo che una mole di qualunque sostanza contiene sempre un numero fissato di atomi o molecole. È il numero di Avogadro, che vale poco più di seicentomila miliardi di miliardi (6×10^{23}). Ecco dunque la risposta: il peso del cubetto di ghiaccio che sentiamo nel palmo della mano è il risultato combinato della massa di seicentomila miliardi di miliardi di molecole H_2O , o circa 10,8 milioni di miliardi di miliardi di protoni e neutroni (fig. 3).⁴

Bisognava accettare che gli atomi non erano più indivisibili come pensavano gli antichi Greci. Inoltre potevano essere trasmutati, fatti passare da una forma all'altra. Nel 1905 Einstein aveva usato la teoria speciale della relatività per dimostrare che la massa e l'energia sono equivalenti, con quella che sarebbe diventata l'equazione più famosa al mondo, $E = mc^2$: energia uguale a massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce. Lunghi dal minare il concetto di massa, tuttavia, l'idea che questa rappresenti un grande serbatoio di energia lo rese in qualche modo ancora più concreto.

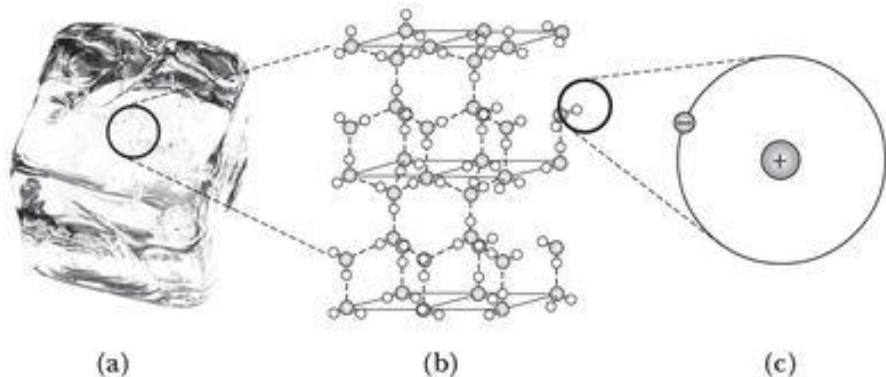


Figura 3 Un cubetto di ghiaccio di 2,7 centimetri di lato pesa circa 18 grammi (a). Consiste in una struttura reticolare che contiene poco più di seicentomila miliardi di miliardi di molecole d'acqua, H_2O (b). Ciascun atomo di ossigeno contiene otto protoni e otto neutroni, mentre ciascun atomo di idrogeno contiene un solo protone (c). Il cubetto di ghiaccio contiene quindi circa 10,8 milioni di miliardi di miliardi di protoni e neutroni.

Concreto, ma non immutabile. Einstein dimostrò che la materia (la massa) non si conserva: può essere convertita in energia. Quando un atomo di uranio 235 è soggetto a fissione in seguito al bombardamento con un neutrone veloce, nella reazione nucleare che ne consegue circa un quinto della massa di un singolo protone viene convertito in energia. Riscaldando ai 56 chili di uranio 235 puro al 90 per cento del nocciolo di una bomba atomica, si ottiene una quantità di energia liberata pari a quella che rase al suolo Hiroshima nell'agosto del 1945.

Ma la verità formulata da Einstein era in realtà più profonda. Ne abbiamo un indizio nel titolo del suo articolo del 1905: «L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto energetico?». ⁵ Einstein si era reso conto che $E = mc^2$ in realtà significa $m = E/c^2$: la massa inerziale non è che una forma di energia. ⁶ Le profonde implicazioni di questa osservazione sarebbero divenute evidenti solo sessant'anni più tardi.

A metà degli anni Trenta, i mattoni primari rappresentati da protoni, neutroni ed elettroni sembravano fornire una risposta esauriente alla nostra domanda di partenza. Ma c'era un problema. Dalla fine del secolo precedente si sapeva che gli isotopi di certi elementi sono instabili. Si tratta di elementi radioattivi: i loro nuclei si disintegrano spontaneamente con una serie di reazioni nucleari.

Ci sono diversi tipi di radioattività. Uno di questi, chiamato radioattività beta da Rutherford nel 1899, comporta la trasformazione di un neutrone del nucleo in un protone, accompagnata dall'emissione di un elettrone ad alta velocità (un «raggio beta»). È una forma

naturale di alchimia: cambiare il numero di protoni nel nucleo ne cambia l'identità chimica.⁷

La radioattività beta implicava che il neutrone fosse una particella instabile e composta, dunque nient'affatto «fondamentale». C'era anche un problema con il bilancio energetico, in questo processo. L'energia teoricamente liberata dalla trasformazione di un protone all'interno del nucleo non era spiegata del tutto dall'energia dell'elettrone emesso. Nel 1930 Pauli aveva concluso che l'unica spiegazione possibile era che l'energia «mancante» nella reazione fosse portata via da una particella mai osservata prima, leggera ed elettricamente neutra, in seguito battezzata *neutrino*. All'epoca si pensava che sarebbe stato impossibile rivelarla; fu invece osservata per la prima volta nel 1956.

Evidentemente era arrivato il momento di trarre le conclusioni. La materia è tenuta insieme da *forze*. A parte la forza di gravità, che agisce universalmente su tutta la materia, a questo punto erano noti altri tre tipi di forza in gioco all'interno dell'atomo.

Le interazioni tra particelle elettricamente cariche derivano dalla forza elettromagnetica, ben nota grazie agli studi pionieristici dei fisici ottocenteschi che, tra i molti risultati notevoli, gettarono le basi della moderna produzione industriale di energia elettrica. Una teoria quantistica pienamente relativistica del campo elettromagnetico, chiamata elettrodinamica quantistica (QED), fu elaborata nel 1948 da Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga. Nella QED le forze di attrazione e repulsione tra particelle cariche sono «trasportate» da particelle dette mediatori di forza.

Due elettroni che si avvicinano, per esempio, si scambiano un mediatore di forza, con l'effetto di respingersi a vicenda (fig. 4). Il mediatore di forza del campo elettromagnetico è il fotone, la particella quantistica che forma la comune luce. La QED si rivelò ben presto una teoria dotata di un potere predittivo straordinario.

C'erano due altre forze da considerare. L'elettromagnetismo non spiegava che cosa tiene legati protoni e neutroni nel nucleo atomico, né le interazioni associate al decadimento beta. Queste interazioni agiscono a scale di energia talmente diverse che non è possibile spiegarle in termini di un'unica forza. Ne servivano due, una forza «forte» che tiene insieme i nuclei atomici, e una forza «debole» responsabile di alcune trasformazioni nucleari.

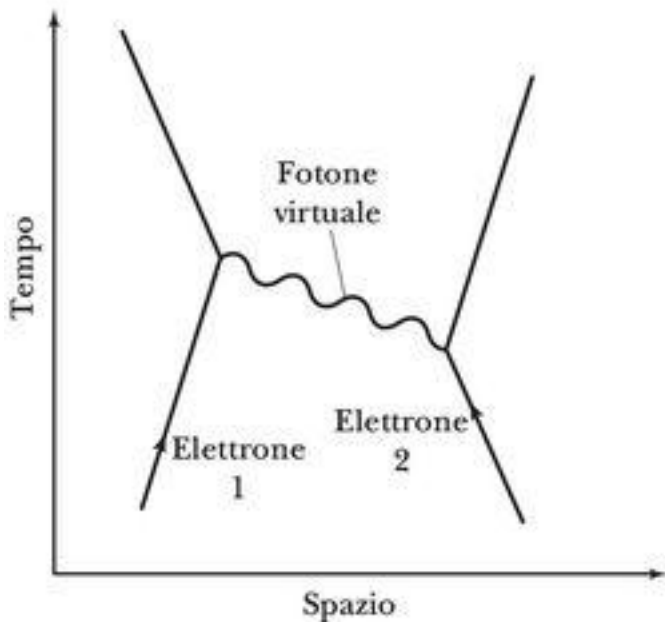


Figura 4 Rappresentazione dell'interazione tra due elettroni così come descritta dall'elettrodinamica quantistica. La forza elettromagnetica di repulsione tra i due elettroni di carica negativa comporta lo scambio di un fotone virtuale nel punto di massimo avvicinamento. Il fotone è «virtuale» perché non è visibile durante l'interazione.

Siamo così giunti al periodo di storia della fisica descritto in questo libro. Altri sessant'anni di fisica delle particelle teorica e sperimentale ci hanno condotto al Modello Standard, un insieme di teorie quantistiche di campo che descrive tutta la materia e tutte le forze tra particelle di materia, ad eccezione della gravità. Il modo più facile per avere un'idea di che cosa sia il Modello Standard e di che cosa significhi per la nostra conoscenza del mondo materiale è fare un rapido excursus nella sua storia.

Il nostro viaggio inizia nel 1915 in Germania, nella tranquilla città universitaria di Gottinga.

PARTE PRIMA

L'INVENZIONE

1
LA POESIA DELLA LOGICA

Nel quale Emmy Noether scopre la relazione tra leggi di conservazione e simmetrie fondamentali della natura.

Siamo tutti d'accordo, credo, che uno degli obiettivi della scienza sia spiegare di che cosa è fatto il mondo e perché è come ci si presenta: a questo scopo, essa cerca di individuare i costituenti fondamentali della materia e le leggi di natura che ne governano il comportamento.

Se concordiamo su questo punto, il passo successivo è ammettere che non tutte le leggi sono uguali. Non tutte sono davvero fondamentali. Nel Seicento Keplero si arrovellò per molti anni sui dati astronomici incredibilmente minuziosi registrati da Tycho Brahe, traendone infine tre leggi che governano il moto dei pianeti attorno al Sole. Sono leggi molto potenti, tuttavia mancano di una spiegazione più fondamentale, che illustri la ragione per la quale i pianeti orbitino attorno al Sole proprio in quel modo. Isaac Newton fornì tale spiegazione: la sua legge di gravitazione universale ha dominato incontrastata per due secoli, prima di venire sostituita dalla relatività generale con le sue interazioni tra materia e spazio-tempo curvo.

Che cos'è dunque una «legge fondamentale»? Non è così difficile rispondere, credo. Molto di quel che sappiamo sulla natura del mondo in cui viviamo si fonda su leggi, ingannevolmente semplici, dette di *conservazione*. Gli antichi Greci credevano che la materia si conservasse. Avevano quasi ragione. In seguito Einstein ci ha insegnato che la materia si può ridurre a energia, e che dall'energia può nascere materia.

La materia (nella forma di sostanza materiale) non si conserva: la massa-energia invece sì. Non sarà mai possibile, per quanto ci si provi, creare o distruggere energia: la si può solo convertire da una forma all'altra. In ogni interazione fisica, di qualunque modello concepibile, l'energia si conserva.

Lo stesso è vero per la quantità di moto, cioè la massa di un oggetto moltiplicata per la sua velocità in una data direzione. A prima vista questo non sembra compatibile con l'esperienza comune. L'ottovolante

di un parco divertimenti spara gli amanti del brivido a grande velocità in orizzontale lungo un binario, che poi si avvolge nel «giro della morte». Il carrello dei passeggeri si inerpica quindi per una ripida salita, perdendo velocità e arrivando a fermarsi prima di essere riportato giù dalla gravità. Il carrello riacquista velocità e ripercorre il giro della morte *al contrario* per poi fermarsi definitivamente. Ora, sembra abbastanza evidente che la quantità di moto non si conservi durante la salita del carrello, visto che questo rallenta fino a fermarsi.

Ma bisogna guardare le cose da un punto di vista più ampio. Via via che il carrello perde velocità il resto del mondo che gli sta sotto, e a cui è attaccato, ne acquista – in quantità impercettibile, ma in modo tale da conservare la quantità di moto totale.

Lo stesso avviene per il momento angolare, che caratterizza i corpi in rotazione ed è dato dalla quantità di moto moltiplicata per la distanza dal centro di rotazione. Una pattinatrice inizia la piroetta con entrambe le braccia e una gamba tese verso l'esterno; ritraendole verso il proprio centro di massa ne riduce la distanza dal centro di rotazione, e in questo modo aumenta la velocità di rotazione. È un caso tipico di conservazione del momento angolare.

Come dimostra l'esempio della quantità di moto, queste leggi non sono per nulla intuitive. Per molti secoli se ne è avuto in qualche modo sentore, ma per riuscire a formulare una legge di conservazione è necessario prima far chiarezza sulla quantità conservata. E il concetto di energia è stato formalizzato e capito solo nel diciannovesimo secolo.

Le leggi di conservazione così come le conosciamo oggi rappresentano il punto di arrivo di una procedura per tentativi ed errori durata secoli, sia nell'esperimento sia nella teoria. Pur se fondamentali, queste leggi rimangono da un certo punto di vista empiriche – derivano cioè dall'osservazione e dall'esperimento, anziché da un modello teorico del mondo profondo e fondamentale. Esiste un principio basilare da cui discendano automaticamente la conservazione dell'energia e della quantità di moto?

La matematica tedesca Amalie Emmy Noether nel 1915 ne era fermamente convinta.

Nata a Erlangen, in Baviera, nel marzo del 1882 e figlia di un matematico dell'Università di Erlangen, nel 1900 Emmy era una delle due sole studentesse di quell'università. Come tutte le istituzioni accademiche tedesche dell'epoca, l'università non incoraggiava gli studenti di sesso femminile, ed Emmy fu costretta a chiedere ai professori il permesso di frequentare le lezioni.

Dopo essersi laureata nell'estate del 1903, trascorse i mesi invernali

presso l'Università di Gottinga, dove ebbe occasione di assistere alle lezioni di alcuni dei maggiori matematici tedeschi, tra cui David Hilbert e Felix Klein. Fece quindi ritorno a Erlangen per lavorare alla tesi di dottorato: qui nel 1908 fu assunta come docente senza stipendio.

Interessatasi al lavoro di Hilbert, pubblicò diversi articoli in cui applicava i suoi metodi al campo dell'algebra astratta. Il lavoro impressionò Hilbert e Klein, i quali all'inizio del 1915 cercarono di riportarla a Gottinga affidandole una cattedra.

Incontrarono una resistenza ostinata.

«Che cosa penseranno i nostri soldati quando, al ritorno dalla guerra, si troveranno a dover studiare agli ordini di una donna?» obiettarono i conservatori del corpo docente.

«Non vedo come il sesso del candidato possa costituire un argomento contro la sua ammissione come *Privatdozent* [professore associato]» rispose Hilbert. Dopo tutto, «una facoltà non è uno stabilimento balneare».1

Hilbert la spuntò, e nell'aprile del 1915 Noether si trasferì a Gottinga. Poco più tardi formulò quello che sarebbe diventato uno dei teoremi più famosi della fisica.

Noether dedusse che i principi di conservazione di grandezze fisiche come l'energia e la quantità di moto si possono ricondurre al comportamento delle leggi che descrivono il sistema considerato in relazione all'applicazione di certe trasformazioni continue, dette di simmetria. Le leggi di conservazione sono manifestazioni delle simmetrie fondamentali della natura.

Noi tendiamo a pensare alla simmetria in termini di riflessione speculare: destra-sinistra, alto-basso, fronte-retro. Diciamo che qualcosa è simmetrico se ha lo stesso aspetto da entrambi i lati rispetto a un centro o a un asse di simmetria. In questo caso la «trasformazione» di simmetria è l'atto di riflettere un oggetto come attraverso uno specchio. Se l'oggetto rimane identico a sé stesso (è «invariante») in seguito a un'operazione di questo tipo, diciamo che è simmetrico.

Per fare un esempio, sembra che la simmetria facciale sia profondamente radicata nella nostra percezione umana di bellezza e desiderabilità, quale indicatore subliminale di qualità genetica. Le persone lodate per la loro bellezza tendono ad avere visi più simmetrici, e come regola generale tendiamo a volerli accoppiare con chi consideriamo bello.

Questi sono esempi di trasformazioni di simmetria dette «discrete», che richiedono un salto istantaneo da una prospettiva all'altra, per

esempio destra-sinistra. Le trasformazioni di simmetria chiamate in causa dal teorema di Noether sono molto diverse: riguardano cambiamenti gradualissimi, come la rotazione continua di un cerchio. Sembra del tutto ovvio che, se ruotiamo un cerchio di un angolo infinitesimo attorno al suo centro, il cerchio appare invariato. Il cerchio è dunque simmetrico rispetto a trasformazioni rotazionali continue. Un quadrato non è simmetrico nello stesso senso: lo è invece rispetto a rotazioni discrete di 90° (fig. 5).

Il teorema di Noether collega ciascuna legge di conservazione a una trasformazione di simmetria continua. Per esempio, le leggi che governano i sistemi in cui l'energia si conserva sono invarianti rispetto a cambiamenti continui o «traslazioni» nel tempo. In altre parole le relazioni matematiche che descrivono la dinamica di un sistema fisico a un dato istante t sono esattamente le stesse dopo un intervallo di tempo infinitesimo.

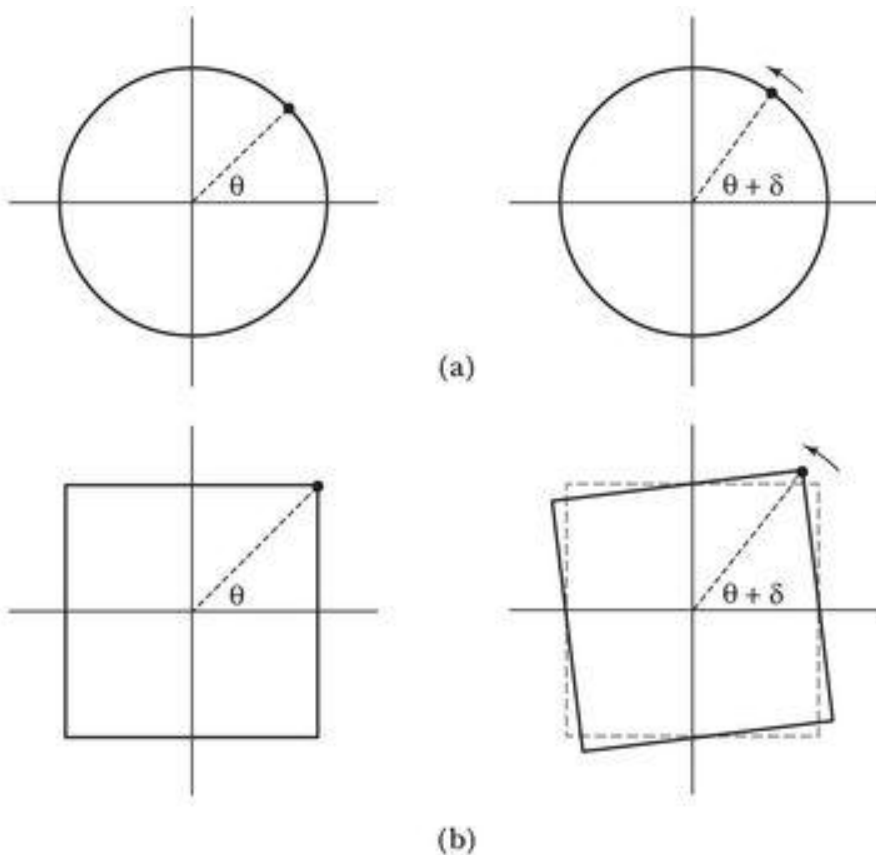


Figura 5 Le trasformazioni di simmetria continue comportano piccole variazioni incrementali di una variabile continua, come una distanza o un angolo. *a)* Quando ruotiamo un cerchio di un piccolo angolo δ , il cerchio appare immutato («invariante»), e lo diciamo quindi simmetrico rispetto a trasformazioni di questo tipo. *b)* Un quadrato, invece, non è simmetrico in quel senso, ma lo è per esempio rispetto a rotazioni *discrete*

Ciò significa che queste leggi non cambiano nel tempo, che è esattamente quel che ci aspettiamo per le relazioni tra grandezze fisiche che vogliamo elevare al rango di «leggi» fondamentali. Le leggi di oggi sono le stesse di ieri e di domani, e questo è molto rassicurante. Se le leggi che descrivono il sistema non cambiano nel tempo, allora l'energia *si deve* conservare.

Per quanto riguarda la quantità di moto, Noether trovò che le leggi dovevano essere invarianti rispetto a *traslazioni spaziali* continue. Le leggi che descrivono il sistema non dipendono dalla posizione nello spazio: sono le stesse qui, là, dovunque. Per quanto riguarda il momento angolare, invece, le leggi sono invarianti rispetto a trasformazioni di simmetria rotazionale, come nell'esempio del cerchio descritto sopra. Sono le stesse indipendentemente dall'orientazione scelta rispetto a un centro di rotazione.

Il ragionamento con cui Noether arrivò al suo teorema è più o meno questo: in fisica ci sono grandezze che sulla base di attente osservazioni ed esperimenti appaiono conservarsi; non senza difficoltà, i fisici hanno dedotto le leggi che governano i fenomeni fisici in cui queste grandezze hanno un ruolo; tali leggi risultano invarianti rispetto a certe trasformazioni continue di simmetria. Questa invarianza significa che le grandezze in questione *devono* necessariamente conservarsi.

Questo procedimento può essere rovesciato. Supponiamo che una grandezza fisica risulti sperimentalmente conservata, ma che le leggi fisiche che descrivono i fenomeni in cui la grandezza è coinvolta non siano ancora state individuate con precisione. Se la grandezza è davvero conservata, allora le leggi – quali che siano – devono essere invarianti rispetto a una trasformazione continua di simmetria. Se riusciamo a scoprire qual è questa simmetria, siamo sulla buona strada per identificare le leggi.

Capovolgere la logica di Noether offre un modo per evitare un buon numero di procedimenti per tentativi a livello teorico. Ai fisici si presentava un metodo per identificare le leggi che aiutava a escludere intere categorie di strutture matematiche. Trovare la simmetria legata alla grandezza fisica in esame fornisce un'ottima scorciatoia.

C'era in effetti una quantità fisica che risultava rigorosamente conservata ma per la quale non erano ancora state dedotte le leggi fisiche appropriate: la carica elettrica.

Il fenomeno dell'elettricità statica era noto ai filosofi dell'antica Grecia. Essi avevano scoperto che era possibile generare cariche elettriche e addirittura scintille strofinando una sostanza come l'ambra su un pezzo di pelliccia. Lo studio scientifico dell'elettricità ha una storia lunga e illustre, e molti protagonisti. Ma fu il fisico inglese

Michael Faraday, della Royal Institution di Londra, che sintetizzò la moltitudine di osservazioni ed esperimenti in un'unica descrizione coerente della carica elettrica. Sulla scorta di numerosi esperimenti, si giunse alla conclusione incontrovertibile che, in qualunque reazione fisica o chimica, la carica elettrica non si crea né si distrugge. La carica si conserva.

Non mancarono leggi o regole per descrivere il comportamento della carica elettrica e il suo legame piuttosto misterioso con il magnetismo – la legge di Coulomb, il teorema di Gauss, la legge di Ampère, quella di Biot-Savart, quella di Faraday, e altre ancora. All'inizio degli anni Sessanta dell'Ottocento il fisico scozzese James Clerk Maxwell fece per l'elettromagnetismo ciò che Newton aveva fatto per la teoria dei moti planetari, fornendo un'audace sintesi teorica da affiancare all'unificazione sperimentale operata da Faraday. Le eleganti equazioni di Maxwell legavano in un intimo abbraccio i campi elettrici e magnetici generati da una carica elettrica in moto.²

Le equazioni dimostravano inoltre che tutte le radiazioni elettromagnetiche – compresa la luce – possono essere descritte da un moto ondulatorio la cui velocità può essere calcolata a partire da costanti fisiche note. Queste sono la permittività elettrica del vuoto (la capacità del vuoto di trasmettere o «permettere» il campo elettrico generato da una carica) e la permeabilità magnetica del vuoto (una misura della capacità del vuoto di creare un campo magnetico attorno a una carica elettrica in moto). Quando Maxwell combinò le due costanti nel modo prescritto dalla sua nuova teoria, trovò che la velocità prevista per le «onde di elettromagnetismo» era esattamente quella della luce.

Ma le equazioni di Maxwell trattano dei *campi* generati dalla carica elettrica, non della carica stessa. I due concetti sono intimamente legati, ma le equazioni non forniscono alcun principio di base che possa spiegare l'origine della conservazione della carica. Alla luce del teorema di Noether, la ricerca di leggi che descrivessero la fisica legata alla carica elettrica diventava la ricerca di una simmetria continua fondamentale rispetto a cui queste leggi fossero invarianti.

La sfida fu raccolta dal matematico tedesco Hermann Weyl.

Nato nel 1885 a Elmshorn, una cittadina nei pressi di Amburgo, Weyl aveva conseguito il dottorato a Gottinga nel 1908, sotto la guida di Hilbert. Aveva poi accettato una cattedra alla Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) di Zurigo, dove incontrò Albert Einstein e rimase affascinato dai problemi della fisica matematica.

Con la sua teoria generale della relatività del 1915, Einstein aveva eliminato ogni idea di spazio e tempo assoluti. La fisica, sosteneva, deve dipendere solo dalla distanza tra punti e dalla curvatura dello spazio-tempo in prossimità di ciascun punto. È il *principio di*

covarianza generale, e la teoria della gravitazione che ne segue è invariante rispetto a cambiamenti arbitrari di sistemi di coordinate. In altre parole, sebbene esistano leggi naturali della fisica, non esiste un sistema di coordinate «naturale» nell'universo. Noi inventiamo i sistemi di coordinate per aiutarci a descrivere la fisica, ma le leggi in sé non devono dipendere (e in effetti è così) da queste scelte arbitrarie.

Ci sono due modi in cui si può cambiare il sistema di coordinate. Possiamo operare un cambiamento *globale*, applicato uniformemente a tutti i punti dello spazio-tempo. Un esempio di questo tipo di trasformazioni è uno spostamento uniforme delle linee di latitudine e longitudine usate dai cartografi per mappare la superficie terrestre. Se lo spostamento è uniforme e applicato in maniera coerente in tutto il globo, ciò non influenza in alcun modo la nostra capacità di navigare da un punto all'altro.

Ma possiamo anche operare un cambiamento *locale*, cambiando le coordinate in modo diverso in punti diversi dello spazio-tempo. Per esempio, in una regione particolare di spazio potremmo scegliere di ruotare gli assi del nostro sistema di coordinate di un piccolo angolo, e al contempo di cambiare la scala. Se la variazione viene tradotta in modo corretto nelle misure di differenze di posizione e di intervalli temporali, non cambia nulla nelle previsioni della relatività generale. La covarianza generale è dunque un esempio di invarianza rispetto a trasformazioni locali di simmetria.

Weyl rifletté a lungo sul teorema di Noether, lavorando sulla teoria dei gruppi continui di simmetria chiamati gruppi di Lie (dal nome del matematico norvegese del diciannovesimo secolo Sophus Lie). Nel 1918 concluse che le leggi di conservazione sono legate a trasformazioni locali di simmetria, alle quali diede il nome generico di *simmetrie di gauge*, un termine purtroppo abbastanza oscuro. Guidato dai lavori di Einstein, Weyl pensava alla simmetria in relazione alla distanza tra punti dello spazio-tempo, come nell'esempio di un treno che viaggia su binari a scartamento [*gauge* in inglese] fisso.

Generalizzando il principio di covarianza generale a un principio di invarianza di gauge, Weyl scoprì che si poteva usare la teoria di Einstein come base per ricavare le equazioni di Maxwell per l'elettromagnetismo, unificando di fatto le due forze allora conosciute: elettromagnetismo e gravità. L'invarianza identificata con le leggi di conservazione sarebbe in questo caso in relazione con la scelta arbitraria della «gauge» dei campi coinvolti. In questo modo Weyl sperava di dimostrare la conservazione di energia, quantità di moto, momento angolare e carica elettrica.

Inizialmente Weyl attribuì l'invarianza di gauge allo spazio stesso. Ma, come fece notare ben presto Einstein, questo implicava che la

misura della lunghezza di un righello o l'ora segnata da un orologio dipendessero dalla loro storia recente. Un orologio spostato da un punto all'altro di una stanza non segnerebbe più l'ora corretta. «Indipendentemente dal loro [delle idee di Weyl] accordo con la realtà, si tratta in ogni caso di una grandiosa conquista dell'intelletto» scrisse Einstein a Weyl.³

Infastidito da questa critica, ma convinto che l'intuito di Einstein in queste cose fosse generalmente attendibile, Weyl abbandonò la sua teoria.

Erwin Schrödinger entrò come docente all'Università di Zurigo tre anni più tardi, nel 1921. Dopo pochi mesi, a causa di una sospetta tubercolosi polmonare, gli fu prescritta una cura di riposo assoluto. Il fisico austriaco passò dunque nove mesi in compagnia della moglie Anny in una villa nella cittadina alpina di Arosa, in Svizzera, località sciistica alla moda.

Mentre si rimetteva in salute assistito da Anny, Schrödinger rifletté sul significato della simmetria di gauge e, in particolare, su un «fattore di gauge» periodico che compariva nella teoria di Weyl. Nel 1913 Niels Bohr aveva pubblicato i dettagli di una teoria della struttura atomica in cui gli elettroni potevano orbitare attorno al nucleo solo a energie fissate caratterizzate da «numeri quantici». Questi sono numeri interi che dispongono le orbite in ordine crescente di energia (1, 2, 3, ...), da quella più interna a quella più esterna, e la cui origine, all'epoca, era un totale mistero.

Colpito dall'idea che ci potesse essere una connessione tra la periodicità implicata dal fattore di gauge di Weyl e quella implicata dalle orbite atomiche quantizzate di Bohr, Schrödinger prese in esame un paio di forme possibili per il fattore di gauge. Una di esse conteneva un numero complesso, cioè un numero che si ottiene sommando un numero reale a un multiplo dell'unità immaginaria i , radice quadrata di -1 . In un articolo pubblicato nel 1922, Schrödinger ipotizzò che questa connessione avesse un significato fisico profondo. Ma era solo una vaga intuizione. Il vero significato di questo legame gli sarebbe rimasto oscuro fino a quando lesse la tesi di dottorato del francese Louis de Broglie, scritta nel 1924.

De Broglie aveva teorizzato che, se le onde elettromagnetiche possono comportarsi come particelle,⁴ allora forse anche particelle come gli elettroni possono avere talvolta un comportamento ondulatorio. Qualunque cosa fossero, queste «onde di materia» non potevano essere in alcun modo assimilate ad altri fenomeni ondulatori familiari, come le onde sonore o le onde che si infrangono sulla spiaggia. De Broglie concluse che l'onda di materia «rappresenta la

distribuzione spaziale di una *fase*; è in altre parole un’“onda di fase”».5

Schrödinger iniziò a chiedersi quale avrebbe potuto essere la rappresentazione matematica di un elettrone descritto come un’onda. Nelle vacanze natalizie del 1925 tornò ad Arosa – stavolta in compagnia di una sua vecchia fiamma viennese, dato che i rapporti con la moglie attraversavano un periodo di crisi profonda. Al ritorno, l’8 gennaio 1926, aveva scoperto la *meccanica ondulatoria*, una teoria che descrive l’elettrone come un’onda e le orbite della teoria atomica di Bohr in termini di «funzioni d’onda» dell’elettrone.

Ora era possibile stabilire la connessione. Un esempio di gruppo di Lie è il gruppo di simmetria $U(1)$, o gruppo delle trasformazioni unitarie di una variabile complessa, che riguarda trasformazioni per molti aspetti analoghe alle rotazioni continue del cerchio. Ma mentre il cerchio è disegnato in un piano bidimensionale a dimensioni reali, le trasformazioni del gruppo $U(1)$ riguardano le rotazioni nel piano bidimensionale *complesso*: quest’ultimo è formato da due dimensioni reali, una delle quali viene moltiplicata per i .

Questo gruppo di simmetria può essere rappresentato anche in termini di trasformazioni continue dell’*angolo di fase* di un’onda sinusoidale (fig. 6). Diversi angoli di fase corrispondono a diversi valori dell’ampiezza dell’onda nel suo ciclo di picchi e gole. La simmetria di gauge di Weyl si mantiene se a cambiamenti nella fase della funzione d’onda dell’elettrone corrispondono cambiamenti nel campo elettromagnetico a questo associato. La conservazione della carica elettrica può essere ricondotta alla simmetria di fase globale della funzione d’onda dell’elettrone.

La connessione tra la meccanica ondulatoria e la teoria di gauge di Weyl fu resa esplicita nel 1927 dal giovane teorico tedesco Fritz London e dal russo Vladimir Fok. Nel 1929 Weyl riformulò la sua teoria, estendendola al contesto della meccanica quantistica.

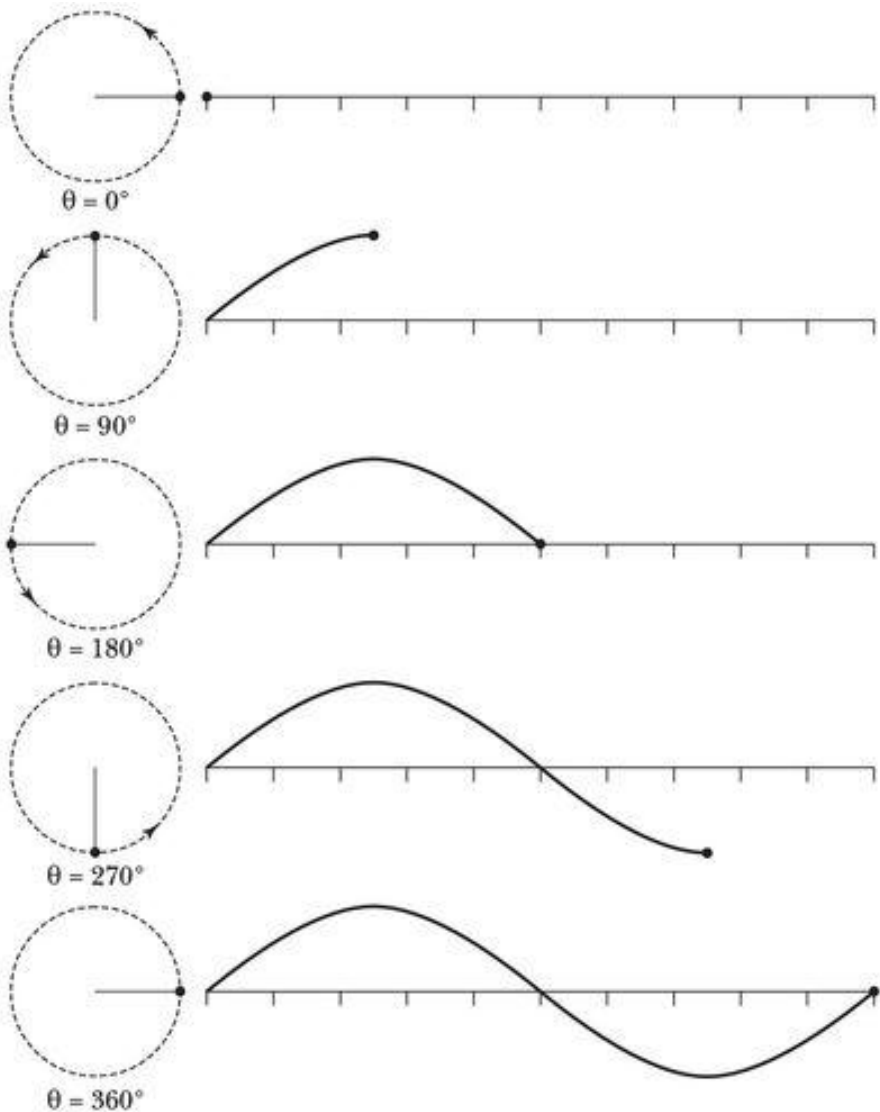


Figura 6 Il gruppo di simmetria $U(1)$ è il gruppo delle trasformazioni unitarie di una variabile complessa. Nel piano complesso, formato da un asse reale e un asse immaginario, qualunque numero complesso giacente sulla circonferenza ottenuta ruotando la linea che congiunge l'origine al punto può essere individuato attraverso l'angolo θ che tale linea forma con l'asse delle x . C'è un legame profondo tra questa simmetria continua e il semplice moto ondulatorio, in cui l'angolo θ è l'angolo di fase.

La «dualità» onda-particella di De Broglie implicava che l'elettrone dovesse essere considerato sia particella sia onda. Ma com'era possibile? Le particelle sono pezzetti localizzati di materia, le onde sono perturbazioni delocalizzate in un mezzo (si pensi alle onde in uno stagno in cui è stato gettato un sasso). Le particelle sono «qui», le onde sono «qui, là, dappertutto».

Una delle conseguenze fisiche della dualità onda-particella è che di una particella quantistica non si possono misurare simultaneamente in maniera precisa la posizione e la quantità di moto. Ragioniamoci: se è possibile misurare con precisione la posizione di una particella-onda significa che questa è localizzabile nello spazio e nel tempo. È «qui». Per un'onda ciò è possibile solo se è formata combinando un grande numero di onde di lunghezza d'onda diversa, così da dar luogo a un'ampizza grande in una data regione e piccola in tutto il resto dello spazio. Questo ci dà la posizione, ma al prezzo di una totale indeterminazione della lunghezza d'onda.

Ma nell'ipotesi di De Broglie la lunghezza d'onda è direttamente legata alla quantità di moto della particella.⁶ Indeterminazione della lunghezza d'onda significa dunque indeterminazione della quantità di moto.

È vero anche l'opposto: se vogliamo essere precisi sulla lunghezza d'onda, e dunque sulla quantità di moto della particella, dobbiamo rimanere su una singola onda con una singola lunghezza d'onda. Ma allora è impossibile localizzarla: la particella-onda rimane sparpagliata nello spazio e non è possibile misurare una posizione precisa.

Questa indeterminazione nella posizione e nella quantità di moto è alla base del famoso principio scoperto da Werner Heisenberg nel 1927, ed è una conseguenza diretta del dualismo onda-particella nel comportamento degli oggetti quantistici.

Nel 1930 Weyl accettò la cattedra lasciata libera da Hilbert e tornò a Gottinga, dove trovò Emmy Noether, che non si era mai mossa di lì, a parte un breve soggiorno di studio all'Università statale di Mosca nell'inverno 1928-29.

Nel gennaio 1933 Adolf Hitler divenne cancelliere in Germania. Qualche mese dopo, il governo nazionalsocialista introdusse la legge per il rinnovo dell'amministrazione pubblica. Era il primo di quattrocento decreti del genere, e forniva le basi legali per l'interdizione agli ebrei di qualunque posizione nell'amministrazione pubblica, incluse quelle accademiche nelle università.

Weyl, la cui moglie era ebrea, lasciò la Germania e raggiunse Einstein all'Institute for Advanced Study di Princeton. Emmy Noether era ebrea, e perse l'incarico a Gottinga, senza essere mai stata promossa a professore ordinario. Si trasferì al Bryn Mawr College, in Pennsylvania, dove morì due anni più tardi, all'età di 53 anni.

In un necrologio pubblicato sul «New York Times» poco dopo la sua morte, Einstein scrisse:⁷

Secondo il giudizio dei più competenti matematici viventi,

Fräulein Noether è stata il genio creativo matematico più significativo mai apparso da quando le donne hanno accesso all'istruzione superiore. Nel campo dell'algebra, che ha visto impegnati per secoli i matematici più dotati, ha scoperto metodi che si sono dimostrati di enorme importanza per la formazione della nuova generazione di giovani matematici. La matematica pura è, a suo modo, la poesia della logica. Si va alla ricerca delle più generali idee operazionali che riescano a mettere insieme in una forma semplice, logica e unificata la cerchia più vasta possibile di relazioni formali. In questa ricerca della bellezza logica le formule spirituali si rivelano necessarie per una maggiore penetrazione nelle leggi della natura.

Nel quale Chen Ning Yang e Robert Mills tentano di formulare una teoria quantistica di campo della forza nucleare forte e fanno arrabbiare Wolfgang Pauli.

Quando Dirac riuscì a combinare la teoria dei quanti con la relatività speciale, nel 1927, il risultato fu la comparsa dello spin dell'elettrone e dell'antimateria. L'equazione di Dirac venne considerata a ragione un'assoluta meraviglia, ma ben presto ci si rese conto che la storia non finiva lì.

I fisici cominciarono ad ammettere la necessità di una teoria completa dell'elettrodinamica quantistica (QED); in sintesi, una versione quantistica delle equazioni di Maxwell che rispettasse la relatività speciale. Una teoria siffatta doveva necessariamente contenere una versione quantistica del campo elettromagnetico.

Alcuni ritenevano che i campi fossero più fondamentali delle particelle. Si pensava che una corretta descrizione quantistica dei campi avrebbe automaticamente generato le particelle come «quanti» dei campi stessi, mediatori delle forze di interazione tra le particelle. Sembrava chiaro che i quanti del campo elettromagnetico fossero i fotoni, creati e distrutti nell'interazione di particelle cariche.

Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli formularono una prima teoria di campo di questo tipo nel 1929. Ma c'era un grosso problema: non riuscivano a risolvere esattamente le equazioni di campo. In altre parole, non era possibile scrivere una soluzione delle equazioni nella forma di un'unica espressione matematica compatta, applicabile in tutte le circostanze.

Heisenberg e Pauli dovettero ricorrere a un metodo di soluzione alternativo, detto sviluppo perturbativo. L'equazione è riscritta come una somma potenzialmente infinita di una serie di termini: $x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + \dots$. La serie inizia con un'espressione di «ordine zero» (o «imperturbata», corrispondente all'assenza di interazioni) che si può risolvere esattamente. A questa si aggiungono termini «perturbativi» che rappresentano correzioni al prim'ordine (x_1), al secondo (x_2), terzo (x_3) e così via. In linea di principio i successivi

termini dello sviluppo apportano correzioni sempre più piccole al risultato di ordine zero, avvicinando progressivamente il calcolo alla soluzione esatta. L'accuratezza del risultato finale dipende quindi dal numero di termini perturbativi inclusi nel calcolo.

Ma invece di correzioni sempre più piccole, Heisenberg e Pauli trovarono che alcuni termini dello sviluppo perturbativo esplodevano, tendendo a valori infiniti. Applicati all'elettrodinamica quantistica, questi termini furono identificati con la cosiddetta «auto-energia» dell'elettrone, dovuta all'interazione della particella carica con il campo elettromagnetico da lei stessa generato.

Il problema non aveva una soluzione ovvia.

Si giunse a un punto di stallo. Nel 1932 James Chadwick scoprì il neutrone e negli anni successivi Enrico Fermi usò neutroni di alta energia per bombardare atomi di diversi elementi chimici, in cerca di nuova fisica. Sorpresi da alcuni dei risultati di Fermi, i chimici Otto Hahn e Fritz Strassman studiarono i prodotti del bombardamento di atomi di uranio con neutroni. La vigilia di Natale del 1938 Lise Meitner, da molto tempo collaboratrice di Hahn, discusse dei nuovi risultati, ancor più sorprendenti, con il nipote Otto Frisch, anch'egli fisico e come lei esiliato dalla Germania nazista. La loro animata discussione portò alla scoperta della fissione nucleare.

Era una scoperta portentosa, e fu annunciata nel gennaio del 1939, solo nove mesi prima dell'inizio della seconda guerra mondiale. Divenuti improvvisamente da «cervelloni avulsi dal mondo» la più importante risorsa militare di una nazione, i fisici lavoravano ora per trasformare la scoperta della fissione nell'arma più micidiale.

Quando, nel 1947, l'attenzione poté finalmente tornare a concentrarsi sui problemi che assillavano l'elettrodinamica quantistica, ci si rese conto che la fisica teorica era rimasta immobile per quasi un ventennio.

Ben presto però ci fu una nuova esplosione di creatività. Nel giugno del 1947 un gruppo di eminenti fisici statunitensi organizzò un piccolo convegno a inviti al Ram's Head Inn, un alberghetto di Shelter Island, New York.

L'illustre gruppo comprendeva J. Robert Oppenheimer, «padre» della bomba atomica, Hans Bethe, che aveva guidato il gruppo teorico a Los Alamos, Victor Weisskopf, Isidor Rabi, Edward Teller, John van Vleck, John von Neumann, Willis Lamb e Hendrik Kramers. La nuova generazione era rappresentata da John Wheeler, Abraham Pais, Richard Feynman, Julian Schwinger e gli ex studenti di Oppenheimer

Robert Serber e David Bohm. Era stato invitato anche Einstein, che però aveva declinato per motivi di salute.

Al convegno furono resi noti nuovi risultati sperimentali piuttosto sconcertanti. Si era infatti scoperto che uno degli stati quantici dell'atomo di idrogeno era lievemente spostato in energia rispetto a un altro, un fenomeno che, in onore del suo scopritore Willis Lamb, prese il nome di *spostamento di Lamb* (*Lamb shift*). La teoria di Dirac prevedeva invece che i due stati avessero esattamente la stessa energia.

Non solo. Rabi annunciò che una nuova misurazione del fattore g dell'elettrone – una costante fisica che ne descrive l'intensità di interazione con un campo magnetico – dava un valore di circa 2,0020244, mentre la teoria di Dirac prevedeva un fattore g esattamente uguale a 2.

Erano risultati che, in assenza di una teoria completa della QED, non potevano essere spiegati. Se la teoria sembrava essere afflitta da problemi inerenti alla sua struttura matematica, la natura mostrava di non avere problemi con gli infiniti. I fisici dovevano trovare il modo di aggirarli.

La discussione continuò fino a tarda notte. Gli scienziati si divisero in gruppi di due o tre, e le loro argomentazioni riecheggiavano nei corridoi, mentre la passione per la fisica tornava a conquistarli. Come osservò in seguito Schwinger, «Per la prima volta persone che avevano accumulato dentro di sé tutta questa fisica per cinque anni potevano parlare tra loro senza che spuntasse qualcuno da dietro a chiedere: "Avete risolto?"».¹

A un tratto si aprì uno spiraglio. Hendrik Kramers propose di considerare da un nuovo punto di vista la massa dell'elettrone in un campo elettromagnetico, tenendo conto anche dell'auto-energia della particella come contributo aggiuntivo alla sua massa.

Dopo il convegno, Bethe tornò a New York e prese il treno per Schenectady, dove lavorava come consulente part time per la General Electric. Durante il viaggio si mise ad armeggiare con le equazioni della QED. Le teorie esistenti prevedevano un valore infinito per lo spostamento di Lamb, una conseguenza dell'interazione dell'elettrone con sé stesso. Bethe seguì il suggerimento di Kramers e identificò il termine infinito nello sviluppo perturbativo come un effetto di massa elettromagnetico. Come liberarsene?

Bethe pensò che bastasse sottrarlo. Lo sviluppo perturbativo per un elettrone legato nell'atomo di idrogeno contiene un termine di massa infinito. Ma anche lo sviluppo per un elettrone libero contiene lo stesso termine infinito. Perché non sottrarre una serie perturbativa dall'altra, eliminando così i termini infiniti? Apparentemente, sottrarre infinito da infinito dovrebbe dare una risposta priva di senso, ma

Bethe trovò che in una versione semplice e non relativistica dell'elettrodinamica quantistica la sottrazione dava luogo a un risultato che, sebbene non del tutto privo di problemi, si comportava decisamente meglio. Immaginò che, in una teoria della QED pienamente compatibile con la relatività speciale, questa procedura di «rinormalizzazione» avrebbe eliminato completamente il problema e fornito una risposta realistica dal punto di vista fisico.

Dato che la procedura era riuscita a domare in parte il comportamento delle equazioni, Bethe fu in grado di ottenere una stima approssimativa del valore predetto per lo spostamento di Lamb. Incerto su un fattore 2 che aveva inserito nel calcolo, arrivato ai laboratori della General Electric fece una rapida visita in biblioteca e trovò la conferma che il fattore era corretto. Il risultato ottenuto per il valore dello spostamento era solo del 4 per cento maggiore di quello riportato da Lamb alla conferenza di Shelter Island.

La strada era indubbiamente quella giusta.

Ci volle un po' più di tempo per sviluppare una versione definitiva, relativistica e rinormalizzabile, dell'elettrodinamica quantistica. Schwinger ne diede la sua versione in una sessione fiume di cinque ore durante una successiva conferenza, tenutasi nel marzo 1948 nelle Pocono Mountains, in Pennsylvania. I suoi calcoli matematici erano pressoché impenetrabili: solo Fermi e Bethe, a quanto si dice, riuscirono a seguirlo dall'inizio alla fine.

Nel frattempo Feynman, il rivale di Schwinger a New York, aveva sviluppato un metodo radicalmente diverso e molto più intuitivo per tener conto delle correzioni perturbative nella QED. Nessuno dei due capiva il metodo dell'altro, ma quando confrontarono gli appunti alla fine della sessione di Schwinger scoprirono che i risultati erano identici. «Così seppi che non ero pazzo» disse Feynman.²

La storia sembrava finita qui, ma poco dopo il ritorno dalla conferenza di Pocono Oppenheimer ricevette una lettera da Sin-Itiro Tomonaga, nella quale il fisico giapponese gli illustrava un terzo approccio alla QED, altrettanto efficace. Tomonaga aveva usato metodi simili a quelli di Schwinger, ma con una matematica molto più semplice. La situazione era piuttosto confusa: tre modi molto diversi di affrontare la QED relativistica producevano risultati simili, ma nessuno capiva perché.

La sfida fu raccolta da un giovane inglese di nome Freeman Dyson. Il 2 settembre 1948 Dyson salì su un pullman diretto da Berkeley, vicino a San Francisco, alla costa atlantica. «Al terzo giorno di viaggio mi è successa una cosa notevole» scrisse ai genitori qualche settimana più tardi. «Caduto in uno stato di semitorpore, come è normale dopo

48 ore di viaggio, ho cominciato a pensare molto intensamente alla fisica, e in particolare alle teorie antagoniste di Schwinger e Feynman sulla radiazione. Le idee mi si sono fatte via via più coerenti e, prima di rendermi conto di dove fossi, avevo risolto il problema che mi frullava in qualche angolo del cervello da un anno, e cioè la dimostrazione dell'equivalenza delle due teorie».³

Il risultato fu una teoria completamente relativistica della QED capace di predire i risultati sperimentali a livelli di precisione sbalorditivi. Il fattore g dell'elettrone, per esempio, ha un valore previsto di 2,00231930476, da confrontare con quello sperimentale di 2,00231930482.⁴ Per darvi un'idea della precisione di questi numeri usiamo le parole di Feynman: «... se si misurasse con la stessa precisione la distanza tra New York e Los Angeles, si avrebbe un risultato approssimato a meno dello spessore di un capello».⁵

Il successo della QED stabilì alcuni precedenti importanti. Sembrava assodato che il modo corretto di descrivere una particella fondamentale e le sue interazioni fosse in termini di una teoria di campo quantistica in cui la forza è trasportata da particelle mediatrici. Come l'elettromagnetismo di Maxwell, la QED è una teoria di gauge in cui la simmetria di fase U(1) della funzione d'onda dell'elettrone è legata alla conservazione della carica elettrica. L'attenzione era adesso rivolta alla teoria di campo della forza forte, che agisce tra i protoni e i neutroni all'interno del nucleo. Ma qui si presentava un nuovo enigma. Il legame tra la conservazione della carica elettrica e l'elettromagnetismo – classico o quantistico – era intuitivamente ovvio. Per scoprire una teoria di campo quantistica della forza forte, era innanzitutto necessario capire che cosa di preciso si conservasse nelle interazioni forti e a quale simmetria continua si riferisse.

Chen Ning Yang era convinto che la quantità conservata nelle interazioni nucleari forti fosse l'*isospin*.

Nato nel 1922 a Hefei, capitale della provincia orientale cinese di Anhui, Yang studiò all'Università nazionale associata del Sud-Ovest, formata dall'unione degli atenei di Tsinghua, Pechino e Nankai dopo l'invasione giapponese del 1937. Si laureò nel 1942 e conseguì un master due anni dopo. Con in tasca la borsa di studio nota come Boxer Indemnity,⁶ nel 1946 partì alla volta dell'Università di Chicago.

Qui studiò fisica nucleare sotto la guida di Edward Teller. Ispirato dalla lettura della biografia di Benjamin Franklin, scelse come secondo nome Franklin, o semplicemente Frank. Ottenuto il dottorato nel 1948, lavorò per un altro anno come assistente di Fermi, finché nel 1949 si trasferì all'Institute for Advanced Study di Princeton.

Qui iniziò a pensare come formulare una teoria di campo

dell'interazione forte a partire dal teorema di Noether.

Il concetto di isospin, o spin isotopico, nacque dalla constatazione che la massa del neutrone e quella del protone sono molto simili.⁷ Quando il neutrone fu scoperto, nel 1932, era naturale pensare che fosse una particella composita, fatta da un elettrone e da un protone. Era noto che il decadimento radioattivo beta comporta l'emissione di un elettrone di alta energia direttamente dal nucleo, dove un neutrone si trasforma in protone. Questo sembrava implicare che nel processo uno dei neutroni in qualche modo si liberasse del suo elettrone «in dotazione».

Poco dopo la scoperta del neutrone, Heisenberg usò l'idea del neutrone composito per sviluppare una prima teoria delle interazioni protone-neutrone nel nucleo. Il modello ricalcava da vicino le teorie del legame chimico.

Heisenberg ipotizzò che il protone e il neutrone si legassero insieme nel nucleo scambiandosi un elettrone, e trasformandosi da neutrone a protone o viceversa nel corso del processo. L'interazione tra due neutroni comportava invece l'intervento di due elettroni, scambiati in «direzione» opposta.

Questo suggeriva che nel nucleo i protoni e i neutroni tendessero a perdere la propria identità, passando continuamente da una forma all'altra. A Heisenberg tornava utile immaginare che il protone e il neutrone fossero semplicemente due stati diversi della stessa particella, caratterizzati da diverse proprietà: la carica elettrica, per esempio, per uno positiva e per l'altro neutra. Ma per far funzionare la teoria c'era bisogno di introdurre una proprietà ulteriore, analoga allo spin dell'elettrone.

Heisenberg introdusse quindi il concetto di isospin (che non va confuso con lo spin dell'elettrone), in cui al protone è assegnata (arbitrariamente) l'orientazione all'insù e al neutrone quella all'ingiù. Si tratta di orientazioni in uno «spazio di isospin» che ha solo due dimensioni, «su» e «giù». Trasformare un neutrone in protone è quindi equivalente a «ruotare» l'isospin del neutrone in questo spazio, portandolo da «giù» a «su».

Tutto ciò suona molto misterioso, ma per molti aspetti l'isospin è come la carica elettrica. La nostra dimestichezza con l'elettricità non deve impedirci di vedere che anche questa è una proprietà che assume «valori» (anziché «orientazioni») in un astratto «spazio di carica» che ha due dimensioni – positiva e negativa.

Anche come semplice analogia, la teoria di Heisenberg era un po' stracchiata. La forza dei legami chimici dovuti agli scambi elettronici è molto più debole della forza che lega insieme protoni e neutroni nel nucleo. Ma la teoria permise a Heisenberg di applicare la meccanica quantistica al nucleo atomico e a spiegare, in una serie di articoli

pubblicati nel 1932, molte osservazioni sperimentali della fisica nucleare, quali le stabilità relative degli isotopi.

I punti deboli della teoria furono evidenziati da esperimenti condotti solo qualche anno dopo. Dato che i protoni non hanno un elettrone «in dotazione», il modello di Heisenberg non prevedeva alcuna interazione fra protoni. Gli esperimenti invece mostrarono che la forza tra protoni è paragonabile per intensità a quella tra protoni e neutroni.

Nonostante i difetti, il modello conteneva una certa dose di verità. Lo scambio di elettroni fu abbandonato, ma fu mantenuto il concetto di isospin. Dal punto di vista della forza forte, il protone e il neutrone sono a tutti gli effetti due stati della stessa particella, come le due orientazioni di spin dell'elettrone: l'unica loro differenza è il valore dell'isospin.

Gli isospin dei singoli protoni e neutroni si possono sommare per dar luogo a un isospin totale, concetto introdotto per la prima volta nel 1937 da Eugene Wigner. La letteratura scientifica sembrava confermare l'idea che nelle reazioni nucleari l'isospin totale si conservasse, proprio come nei processi chimici e fisici si conserva la carica elettrica.

Yang identificò l'isospin con una simmetria locale di gauge, simile a quella legata alla fase della funzione d'onda dell'elettrone nella QED, e si mise alla ricerca di una teoria quantistica che la conservasse. Ben presto si impantanò, ma rimase ossessionato dal problema: «A volte una qualche ossessione risulta contenere qualcosa di buono» osservò in seguito.⁸

Nell'estate del 1953 chiese un breve periodo di congedo dall'Institute for Advanced Study e fece visita al Brookhaven National Laboratory di New York, dove si trovò a condividere l'ufficio con un giovane fisico di nome Robert Mills.

Mills si fece coinvolgere dall'ossessione di Yang, e i due lavorarono insieme a una teoria di campo quantistica dell'interazione nucleare forte. «Non c'era nessun'altra motivazione più immediata» spiegò Mills qualche anno più tardi. «Ci siamo limitati a chiederci “Se una cosa succede una volta, perché non può succedere di nuovo?”».⁹

Nella QED le variazioni di fase della funzione d'onda elettronica dipendenti dallo spazio e dal tempo sono compensate da corrispondenti variazioni nel campo elettromagnetico, che «reagisce» in modo da mantenere la simmetria. Ma una nuova teoria di campo della forza forte doveva tener conto del fatto che le particelle coinvolte erano due. Se l'isospin si conserva, significa che l'interazione forte non vede alcuna differenza tra protone e neutrone. «Ruotare»

l'isospin, trasformando per esempio un neutrone in un protone, richiede un campo che «reagisca» ristabilendo la simmetria. Yang e Mills introdussero quindi un nuovo campo che avesse queste caratteristiche, e lo battezzarono «campo B».

Il semplice gruppo di simmetria $U(1)$ era insufficiente; Yang e Mills optarono per $SU(2)$, il gruppo delle trasformazioni unitarie speciali di due variabili complesse. Era necessario un gruppo più ampio perché stavolta c'erano due oggetti, che si potevano trasformare l'uno nell'altro.

La teoria aveva bisogno anche di tre nuove particelle di campo, mediatrici dell'interazione forte tra protoni e neutroni all'interno del nucleo, e analoghe del fotone nella QED. Due delle tre particelle di campo dovevano essere elettricamente cariche, per spiegare il cambiamento di carica nelle transizioni protone-neutrone o neutrone-protone: Yang e Mills le chiamarono B^+ e B^- . La terza particella, neutra come il fotone, doveva spiegare le interazioni protone-protone o neutrone-neutrone in cui non c'è cambiamento di carica, e fu chiamata B_0 . Risultò che queste particelle di campo interagivano non solo con protoni e neutroni, ma anche tra loro.

Alla fine dell'estate i due fisici avevano trovato una soluzione, che però presentava una nuova serie di problemi.

Innanzitutto, i metodi di rinormalizzazione usati con successo nella QED non si potevano applicare a questa nuova teoria. Ancor peggio, il termine di ordine zero nello sviluppo perturbativo indicava che le particelle mediatrici dovevano essere prive di massa, come il fotone. Ma questo non tornava. Heisenberg e il fisico giapponese Hideki Yukawa nel 1935 avevano mostrato che le particelle mediatrici di interazioni a corto raggio come quella nucleare forte devono essere «pesanti», ossia avere una massa rilevante. Particelle senza massa non avevano alcun senso, come mediatrici della forza forte.

Yang fece ritorno a Princeton. Il 23 febbraio del 1954 tenne un seminario nel quale presentò il lavoro svolto con Mills. Tra i partecipanti vi erano Oppenheimer e Pauli, che si era trasferito all'Università di Princeton nel 1940. A quanto pare Pauli qualche tempo prima aveva provato a muoversi sulla stessa linea logica, giungendo alle stesse problematiche conclusioni sulla massa dei mediatori di forza, e aveva di conseguenza abbandonato l'idea. Mentre Yang scriveva le sue equazioni sulla lavagna, Pauli, che intuiva la risposta, chiese: «Qual è la massa di questo campo B?».

«Non lo so» rispose Yang con voce un po' flebile.

«Qual è la massa di questo campo B?» insisté con forza Pauli.

«Ci abbiamo pensato» rispose Yang. «È una questione molto complessa, non possiamo dare una risposta ora».

«Un po' debole, come scusa» grugnì Pauli.¹⁰

Accusando il colpo, Yang tornò a sedersi, tra l'imbarazzo generale. «Credo che dovremmo lasciar continuare Frank» propose Oppenheimer, e Yang riprese la sua esposizione. Pauli non fece più domande, ma era irritato. Il giorno seguente lasciò a Yang un messaggio: «Mi rincresce che mi abbia reso quasi impossibile parlarle dopo il seminario».¹¹

Il problema, insomma, sussisteva. Prive di massa, le particelle mediatrici della teoria di Yang e Mills non concordavano con le aspettative fisiche. Se avessero avuto massa nulla come richiesto dalla teoria, sarebbero state dappertutto, come i fotoni; al contrario, non erano mai state osservate. I metodi ormai accettati di rinormalizzazione, inoltre, non funzionavano.

Eppure, era una *bella* teoria.

«L'idea era *bella* e doveva essere pubblicata» scrive Yang. «Ma qual è la massa della particella di gauge? Non avevamo alcuna conclusione certa, ma solo esperienze frustranti, le quali mostravano che questo caso è molto più complicato dell'elettromagnetismo. Tendevamo a credere, per motivi fisici, che le particelle di gauge dotate di carica non potessero essere prive di massa».¹²

Yang e Mills pubblicarono i loro risultati in un articolo dell'ottobre 1954, nel quale scrivevano: «Prossimamente affronteremo la questione della massa del quanto [B], per la quale non abbiamo per ora una risposta soddisfacente».¹³

Non avendo fatto alcun passo avanti, i due scienziati rivolsero la propria attenzione altrove.

*Nel quale Murray Gell-Mann scopre la stranezza e l'«Ottuplice Via»,
mentre Sheldon Glashow applica la teoria di Yang e Mills alla forza
nucleare debole, ma non lo seguono in molti*

Yang e Mills avevano cercato di applicare la teoria di gauge alle interazioni forti nella speranza di ripetere il successo della QED. Ma avevano trovato che la teoria non si poteva rinormalizzare e dava massa nulla a particelle che invece avrebbero dovuto essere massive. Ovviamente non poteva essere questa la soluzione per la forza forte.

Ma quella debole?

La forza debole era una sorta di mistero. Enrico Fermi era stato obbligato a invocare un nuovo tipo di forza nella teoria dettagliata della radioattività beta che aveva elaborato all'inizio degli anni Trenta, e descritto ai colleghi durante una vacanza sciistica sulle Alpi nel Natale del 1933. Il suo collega Emilio Segrè ricorda così l'esperienza: «Eravamo seduti su un letto in una stanza dell'albergo e io riuscivo a malapena a star fermo in quella posizione, pieno com'ero di lividi dopo le cadute della giornata sulla neve ghiacciata. Fermi era perfettamente conscio dell'importanza del suo risultato: disse che con ogni probabilità sarebbe stato ricordato per questo articolo, il migliore che avesse scritto fino a quel momento».1

Fermi aveva tracciato parallelismi con l'elettromagnetismo, e dalla teoria delle interazioni così ottenuta era stato in grado di calcolare le energie (e quindi le velocità) degli elettroni emessi nei decadimenti beta. Le sue predizioni furono confermate dagli esperimenti condotti alla Columbia University da Chieng-Shiung Wu («Madame Wu») nel 1949. Salvo qualche piccolo aggiustamento, la sua teoria rimane valida ancor oggi.

Fermi dedusse che l'intensità delle interazioni tra le particelle coinvolte nei decadimenti beta era circa dieci miliardi di volte più debole di quella elettromagnetica tra particelle cariche. Una forza davvero debole, ma dalle conseguenze assai rilevanti. A causa dell'interazione debole, per esempio, i neutroni sono intrinsecamente instabili: nel vuoto, un neutrone libero sopravvive intatto in media

solo 18 minuti. Un comportamento insolito per una particella che dovrebbe essere fondamentale o elementare.²

Naturalmente era un po' eccessivo invocare una nuova forza della natura per spiegare un unico tipo di interazione. Tuttavia, non appena gli sperimentali iniziarono a setacciare lo «zoo» di particelle elementari che venivano via via scoperte tra i frammenti delle collisioni ad alta energia, cominciarono a emergere le prove dell'esistenza di altri tipi di particelle soggette alla forza debole.

Negli anni Trenta, chi voleva studiare le collisioni di particelle ad alta energia doveva scalare una montagna. I raggi cosmici – flussi di particelle di alta energia provenienti dallo spazio – bombardano costantemente gli strati esterni dell'atmosfera. Le più energetiche tra queste particelle riescono a penetrare fino a strati più bassi dell'atmosfera e le loro collisioni possono essere studiate sulle cime dei monti più alti. Dato che questi studi si basano sulla rivelazione casuale delle particelle, non si verificano mai due eventi nelle stesse condizioni.

Nel 1936, quattro anni dopo aver scoperto il positrone di Dirac, Carl Anderson, assieme al collega Seth Neddermeyer, caricò un rivelatore di particelle su un furgoncino diretto al Pikes Peak, sulle Montagne Rocciose, una quindicina di chilometri a ovest di Colorado Springs.³ Fra le tracce lasciate dai raggi cosmici i due fisici identificarono una particella nuova, che si comportava esattamente come un elettrone ma veniva deflessa molto meno dai campi magnetici.

La particella curvava più dolcemente di un elettrone e più bruscamente di quanto curverebbe (in direzione opposta) un protone di velocità paragonabile. L'unica possibilità era concludere che si trattasse di un nuovo elettrone «pesante», con una massa circa duecento volte maggiore di quella dell'elettrone comune. Non poteva essere un protone, perché questo ha una massa circa duemila volte superiore a quella dell'elettrone.⁴

La nuova particella fu inizialmente chiamata mesotrone, in seguito accorciato a «mesone». Era una scoperta poco gradita. Una versione pesante dell'elettrone? Non tornava con nessuna delle teorie o dei preconcetti sull'organizzazione dei mattoni fondamentali della natura.

«E questo chi l'ha ordinato?»⁵ chiese irritato Isidor Rabi, il fisico americano di origine galiziana; e anche Willis Lamb, nella sua conferenza di accettazione del Nobel del 1955, lasciò trasparire il senso generale di frustrazione dicendo: «Una volta chi avesse scoperto una nuova particella elementare sarebbe stato insignito del premio Nobel; oggi dovrebbe prendersi 10.000 dollari di multa».⁶

Nel 1947 Cecil Powell, dell'Università di Bristol, scoprì con l'aiuto

della sua équipe un'altra particella nei raggi cosmici registrati sulla cima del Pic du Midi, nei Pirenei francesi. La particella aveva una massa lievemente superiore a quella del mesone, cioè pesava 273 volte più dell'elettrone, e si presentava in più versioni: positiva, negativa o (si scoprì in seguito) neutra.

I fisici cominciavano ad avere difficoltà con i nomi. Il vecchio mesone fu ribattezzato mesone mu, in seguito abbreviato a muone,⁷ mentre la nuova particella fu chiamata mesone pi-greco, o pione. A mano a mano che le tecniche di rivelazione diventavano più raffinate, le particelle crescevano come funghi. Il pione fu seguito rapidamente dai mesoni K, positivi e negativi, e dalla particella neutra lambda. I nuovi nomi proliferavano. Alla domanda di un giovane fisico, Fermi rispose: «Giovanotto, se fossi in grado di ricordarmi i nomi di tutte queste particelle avrei fatto il botanico». ⁸

I mesoni K e la particella lambda si comportavano in maniera piuttosto bizzarra. Venivano prodotti in abbondanza, segno che era coinvolta l'interazione forte. Spesso erano prodotti a coppie, dando luogo alle caratteristiche figure a «V» nell'apparato tracciante, e quindi proseguivano nel rivelatore per un certo tratto, per poi disintegrarsi. La disintegrazione era molto più lenta della produzione: questo suggeriva che, sebbene venissero prodotte dalla forza forte, il loro decadimento fosse governato da una forza molto più debole – la stessa alla base del decadimento beta.

L'isospin non era d'aiuto per spiegare lo strano comportamento delle nuove particelle K e lambda. Sembrava che avessero una proprietà aggiuntiva, fino a quel momento sconosciuta.

L'americano Murray Gell-Mann era perplesso. Si era accorto che poteva spiegare il comportamento delle nuove particelle usando l'isospin, a patto di ipotizzare che questo fosse per qualche motivo «traslato» di un'unità. La cosa non aveva senso dal punto di vista fisico; per spiegare la traslazione propose quindi di introdurre una nuova proprietà, che in seguito chiamò *stranezza*.⁹ Qualche tempo dopo immortalò il termine con una citazione di Francesco Bacone: «Non esiste bellezza squisita senza una qualche stranezza di proporzioni». ¹⁰

Secondo Gell-Mann la stranezza, qualunque cosa fosse, si conservava nelle interazioni forti, proprio come l'isospin. In un'interazione forte riguardante particelle «normali» (cioè non strane), la produzione di una particella con stranezza +1 doveva essere accompagnata da quella di un'altra particella con stranezza -1, in modo da conservare la stranezza totale. Per questo le particelle tendevano a essere prodotte in coppia.

La conservazione della stranezza spiegava anche perché quelle particelle impiegassero tanto a decadere. Una volta formate le

particelle strane, la loro trasformazione inversa in particelle normali non era infatti possibile attraverso l'interazione forte, e quindi in tempi rapidi, perché questo avrebbe implicato una variazione della stranezza (da $+1$ o -1 a 0). Le particelle strane dunque rimanevano in vita abbastanza a lungo da soccombere alla forza debole, la quale invece non rispetta la conservazione della stranezza.

Ma nessuno sapeva perché.

Nel suo fondamentale articolo sulla radioattività beta, Fermi aveva tracciato un'analogia tra la forza debole e l'elettromagnetismo, e aveva stimato le intensità relative delle forze coinvolte usando come grandezza di riferimento la massa dell'elettrone. Nel 1941 Julian Schwinger si era chiesto quali conseguenze avrebbe avuto l'ipotesi che la forza debole fosse trasportata da particelle molto più pesanti, e aveva stimato che, attribuendo a tali particelle mediatrici una massa duecento volte più grande di quella del protone, l'intensità della forza debole e quella delle interazioni elettromagnetiche avrebbero potuto essere uguali. Era il primo indizio della possibilità di *unificare* le interazioni deboli e quelle elettromagnetiche in un'unica forza «elettrodebole».

Yang e Mills avevano scoperto che, per tener conto di tutti i modi in cui possono interagire i protoni e i neutroni nel nucleo, servivano tre diversi tipi di mediatori di forza. Nel 1957 Schwinger arrivò alla stessa conclusione a proposito delle interazioni deboli. Pubblicò un articolo in cui ipotizzava che la forza debole fosse trasportata da tre particelle mediatrici. Due di queste, il W^+ e il W^- (per usare i loro nomi moderni), sono necessarie per spiegare la trasmissione di carica elettrica nell'interazione debole. Una terza particella, elettricamente neutra, è necessaria per i casi in cui non c'è trasferimento di carica. Schwinger era convinto che questa terza particella fosse il fotone.

Nell'idea di Schwinger, la radioattività beta funzionerebbe così: un neutrone decade emettendo una particella pesante W^- e trasformandosi in un protone. Il W^- , che ha vita molto breve, a sua volta decade in un elettrone ad alta velocità (la particella beta) e in un antineutrino (fig. 7).

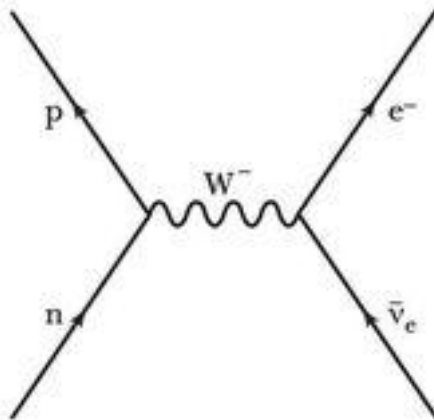


Figura 7 Il meccanismo del decadimento beta del nucleo poteva essere ora spiegato in termini del decadimento di un neutrone (n) in un protone (p) attraverso l'emissione di una particella W^- . Il W^- decade quindi in un elettrone (e^-) e in un antineutrino $\bar{\nu}_e$.

Schwinger chiese a uno dei suoi dottorandi di Harvard di occuparsi del problema.

Nato negli Stati Uniti da genitori ebrei emigrati dalla Russia, Sheldon Glashow si era diplomato alla Bronx High School of Science nel 1950 assieme al compagno di studi Steven Weinberg. Con Weinberg fu ammesso alla Cornell University, dove conseguì il *bachelor's degree* nel 1954, per poi diventare uno dei dottorandi di Schwinger a Harvard.

Le particelle W ipotizzate da Schwinger dovevano per forza avere carica elettrica. Glashow si rese ben presto conto che questo semplice fatto significava che era impossibile separare la teoria delle interazioni deboli da quella dell'elettromagnetismo: «Ci permettiamo di suggerire» scrisse in un'appendice della sua tesi di dottorato «che una teoria pienamente accettabile di queste interazioni si potrà ottenere solo trattandole insieme».11

Glashow puntava ora a una teoria di gauge $SU(2)$ come quella sviluppata da Yang e Mills, prendendo per buona sulla fiducia l'affermazione di Schwinger che i tre mediatori della forza debole fossero due particelle W pesanti e il fotone. Per un certo periodo si persuase di essere riuscito a sviluppare una teoria unificata della forza debole e di quella elettromagnetica. Non solo: era convinto che la teoria fosse anche rinormalizzabile.

In realtà aveva commesso una serie di errori. Quando questi furono evidenti, si accorse che la teoria pretendeva un po' troppo dal fotone. La sua soluzione fu allargare la simmetria combinando il campo di gauge $SU(2)$ di Yang e Mills con il campo di gauge $U(1)$ dell'elettromagnetismo in un prodotto indicato con $SU(2) \times U(1)$. Questo rappresentava più una «miscela» tra la forza debole e quella

elettromagnetica che una vera forza unificata elettrodebole, ma aveva il vantaggio di togliere al fotone il peso della responsabilità di alcuni aspetti delle interazioni deboli.

La teoria aveva però sempre bisogno di un mediatore neutro per la forza debole. Glashow aveva ora tre particelle pesanti equivalenti alla tripletta di particelle B introdotte da Yang e Mills: il W_+ , il W_- e la Z_0 .¹²

Nel marzo del 1960 Glashow tenne un seminario a Parigi. Qui incontrò Gell-Mann, che aveva preso un anno di congedo sabbatico dal California Institute of Technology (Caltech) e lavorava come *visiting professor* al Collège de France. Durante il pranzo, Glashow gli descrisse la sua teoria $SU(2) \times U(1)$ e Gell-Mann lo incoraggiò: «Stai facendo un buon lavoro,» gli disse «ma non ti seguiranno in molti».¹³

La comunità dei fisici mostrò ben poco entusiasmo per la teoria di Glashow. Proprio come avevano scoperto Yang e Mills, la teoria $SU(2) \times U(1)$ prevedeva che i mediatori della forza debole fossero privi di massa, come il fotone. Inserire le masse «a mano» nelle equazioni avrebbe reso la teoria non rinormalizzabile. Come Yang e Mills prima di lui, Glashow non riusciva a capire come le particelle mediatrici potessero acquisire massa.

Ma c'era una complicazione ulteriore. Le interazioni tra particelle elementari coinvolgono una o più particelle che decadono, o reagiscono le une con le altre, producendone di nuove. Quando queste interazioni sono mediate da particelle cariche si parla di «correnti cariche», perché esse comportano un «flusso» di carica elettrica dalle particelle iniziali a quelle finali. Ci si aspettava che il mediatore neutro della forza debole (la Z_0) si sarebbe manifestato sperimentalmente sotto forma di interazioni che non comportano cambiamenti di carica, cioè «correnti neutre». Non si trovava traccia di questo tipo di corrente nei decadimenti delle particelle strane, che nel frattempo erano diventate il principale terreno di caccia dei fisici delle particelle alla ricerca di dati sulle interazioni deboli.

Glashow cercò di cavarsela spiegando che la Z_0 era talmente più pesante del W da rendere inaccessibili per le possibilità sperimentali dell'epoca le interazioni che la riguardavano. Gli sperimentali storsero il naso.

Murray Gell-Mann è nato a New York nel 1929. *Enfant prodige*, entrò all'Università di Yale a soli quindici anni e conseguì il dottorato al Massachusetts Institute of Technology (MIT) nel 1951, a ventun anni. Per un breve periodo lavorò all'Institute for Advanced Study di Princeton, poi si trasferì all'Università dell'Illinois a Urbana, quindi alla Columbia di New York e infine all'Università di Chicago, con

Fermi, dove si interrogò sulle proprietà delle particelle strane.

Nel 1955 ottenne una cattedra al Caltech, e qui lavorò con Feynman sulla teoria della forza nucleare debole e iniziò a interessarsi al problema di classificare lo «zoo» delle particelle elementari recentemente scoperte. Si intuiva che c'erano piccole strutture all'interno dello zoo – particelle che chiaramente appartenevano alla stessa specie, per esempio –, ma le singole strutture non si incastravano in una descrizione coerente.

I fisici delle particelle avevano nel frattempo introdotto una sorta di tassonomia, per dare almeno un senso di ordine allo zoo. C'erano due classi principali: gli *adroni* (dal greco *hadrós*, «forte») e i *leptoni* (da *leptós*, «sottile»).

La classe degli adroni contiene la sottoclasse dei *barioni* (da *barýs*, «pesante»), particelle pesanti soggette alla forza nucleare forte tra cui il protone (p), il neutrone (n), la lambda (Λ_0), e due ulteriori tipi di particelle scoperte negli anni Cinquanta e chiamate sigma (Σ_+ , Σ_0 , Σ_-) e csi (Ξ_0 , Ξ_-). La classe degli adroni contiene inoltre la sottoclasse dei *mesoni* (da *mésos*, «medio»), anch'esse soggette alla forza forte ma di massa intermedia, come i mesoni pi-greco o pioni (π_+ , π_0 , π_-) e i mesoni K (K_+ , K_0 , K_-).

La classe dei leptoni contiene l'elettrone (e-), il muone (μ_-) e il neutrino (ν). I leptoni sono particelle leggere che non risentono della forza nucleare forte. Barioni e leptoni sono *fermioni* (dal nome di Fermi), hanno cioè spin semintero: tutti i barioni e i leptoni elencati sopra hanno spin 1/2, e possono quindi assumere fino a due orientazioni, corrispondenti ai valori di +1/2 (spin su) e -1/2 (spin giù). I fermioni obbediscono al principio di esclusione di Pauli.

Fuori dalle classi degli adroni e dei fermioni stava il fotone, mediatore della forza elettromagnetica. Il fotone è un *bosone* (dal nome del fisico indiano Satyendra Nath Bose). I bosoni sono caratterizzati da un numero quantico di spin intero e non soggiacciono al principio di Pauli. Ci si aspettava che anche gli altri mediatori di forza, come le ipotetiche particelle W_+ , W_- e Z_0 , fossero bosoni a spin intero non nullo. Sono possibili anche bosoni di spin 0, ma non sono mediatori di forza: ne sono un esempio i mesoni. La classificazione delle particelle note intorno al 1960 è riassunta in [figura 8](#).

Era chiaro che in questa confusione ci doveva essere una struttura, un equivalente particellare della tavola periodica di Mendeleev per gli elementi chimici. Si trattava di capire quale fosse questa struttura e quale la spiegazione sottostante.

Gell-Mann tentò inizialmente di formare uno schema a partire da una tripletta di particelle: il protone, il neutrone e la lambda; usando questi come mattoni fondamentali cercò di costruire tutti gli altri adroni. Ma era un gran pasticcio. Intanto, non era chiaro perché

queste particelle dovessero essere considerate più «fondamentali» delle altre. Gell-Mann si rese conto che stava cercando la spiegazione prima di individuare la struttura vera e propria: era un po' come cercare di individuare i mattoni fondamentali degli elementi chimici senza conoscere la posizione di ciascuno di essi nella tavola periodica.

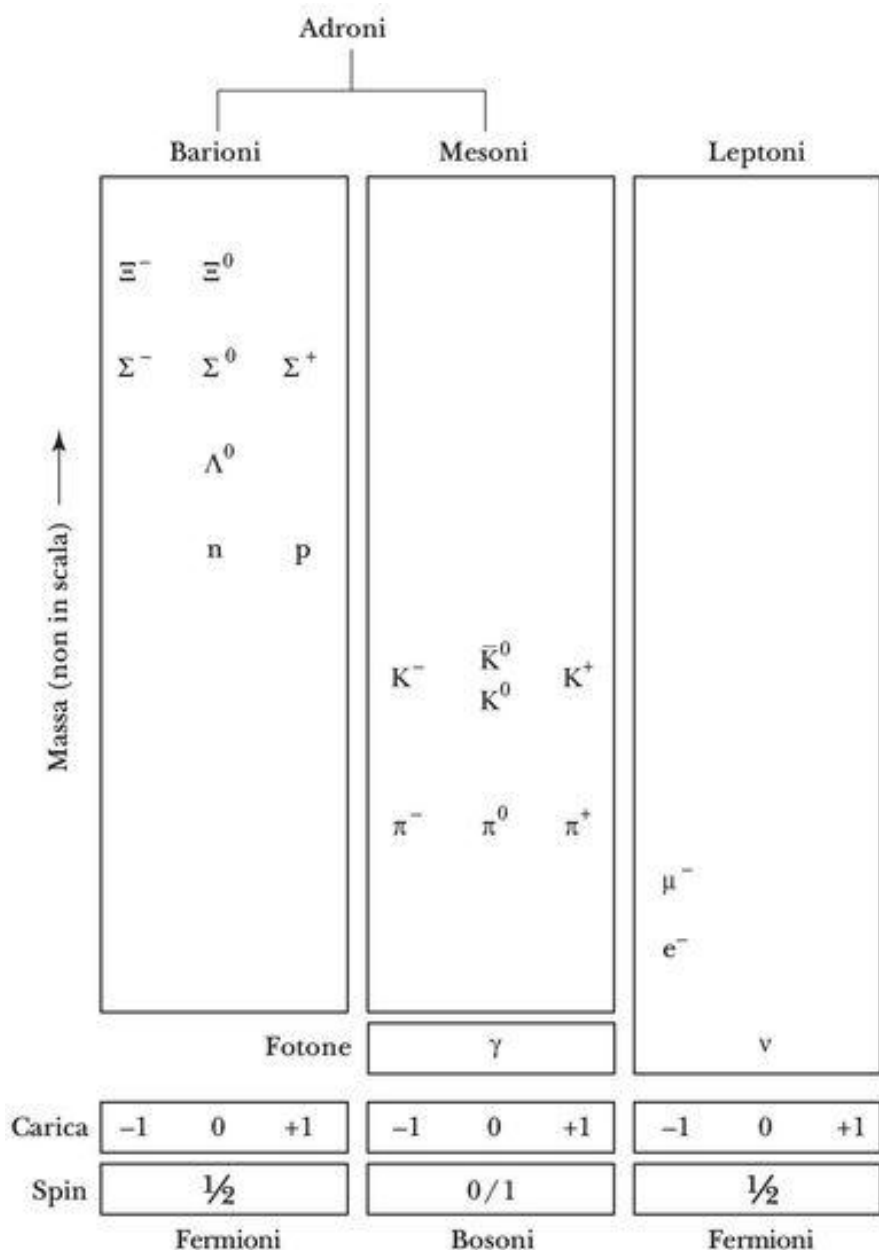


Figura 8 La tassonomia adottata dai fisici delle particelle attorno al 1960 aveva aiutato a organizzare le particelle conosciute in diverse classi: gli adroni (barioni e mesoni) e i leptoni. Fuori dalla classificazione stava il fotone, particella mediatrice

Gell-Mann era convinto che la cornice adatta potesse essere rappresentata da un gruppo di simmetria globale, una maniera per organizzare le particelle tale da rendere manifesta la struttura delle loro relazioni reciproche. A questo punto del suo percorso stava cercando solo un modo per riclassificare le particelle, non di sviluppare una teoria di Yang-Mills, cosa che avrebbe invece richiesto una simmetria locale.

Sapeva che gli serviva un gruppo continuo più grande di $U(1)$ o $SU(2)$ per sistemare la molteplice varietà di particelle allora note, ma era piuttosto incerto su come procedere. In quel periodo era *visiting professor* al Collège de France di Parigi. Le abbondanti libagioni di buon vino francese durante i pasti con i colleghi non furono probabilmente di aiuto nell'indicare la strada verso la soluzione.

La visita di Glashow a Parigi nel marzo del 1960 rappresentò quindi qualcosa più di un incoraggiamento di circostanza. Gell-Mann fu catturato dalla teoria $SU(2) \times U(1)$, e cominciò a capire come si potesse espandere il gruppo di simmetria a un numero maggiore di dimensioni. Cercò dunque altre teorie con dimensionalità sempre più alte: tre, quattro, cinque, sei e sette dimensioni, nel tentativo di individuare una struttura che non corrispondesse al gruppo $SU(2) \times U(1)$. «A quel punto dissi basta. Non avevo la forza, dopo tutto quel vino, di provare con otto dimensioni».¹⁴

A quanto pare il vino non aveva aiutato nemmeno la conversazione: i colleghi con cui Gell-Mann beveva a pranzo erano matematici che avrebbero potuto risolvere il suo problema quasi immediatamente. Ma con loro non ne discusse mai.

Glashow accettò l'invito di Gell-Mann di seguirlo al Caltech, e poco dopo il rientro da Parigi i due fisici si misero al lavoro alla ricerca di una soluzione. Ma solo dopo una discussione casuale con Richard Block, un matematico del Caltech, Gell-Mann scoprì che il gruppo di Lie $SU(3)$ possedeva la struttura cercata. A Parigi aveva gettato la spugna proprio mentre era sul punto di scoprirlo lui stesso.

La rappresentazione «irriducibile» più semplice di $SU(3)$ è una tripletta fondamentale. Altri teorici avevano cercato di costruire un modello basato sul gruppo di simmetria $SU(3)$ usando il protone, il neutrone e la lambda come rappresentazione fondamentale. Gell-Mann aveva già provato questa strada e non voleva ripetere l'esperienza. Saltò quindi a piè pari la rappresentazione fondamentale e rivolse la sua attenzione alle successive.

Una delle rappresentazioni di $SU(3)$ consiste di otto dimensioni. Una «rotazione» in questo spazio trasforma una certa particella, corrispondente a una dimensione, in una particella diversa, corrispondente a un'altra dimensione, proprio come la rotazione

dell'isospin del neutrone nel gruppo di simmetria SU(2) lo trasforma in un protone. Se fosse riuscito a collocare una particella in ogni dimensione, forse avrebbe potuto cominciare a capire la natura delle relazioni soggiacenti. Era una mera coincidenza, che ci fossero otto barioni (il protone, il neutrone, la lambda, tre sigma e due csi)?

Queste particelle si distinguevano le une dalle altre per il valore della carica elettrica, dell'isospin e della stranezza. Se si rappresenta in un diagramma la stranezza in funzione della carica, o dell'isospin, si ottiene un esagono con una particella in corrispondenza di ogni vertice e due particelle al centro (fig. 9). Lo schema comprendeva anche il protone, il neutrone e la lambda, e Gell-Mann dovette sentirsi nel giusto per aver resistito alla tentazione di assegnarli alla rappresentazione fondamentale.

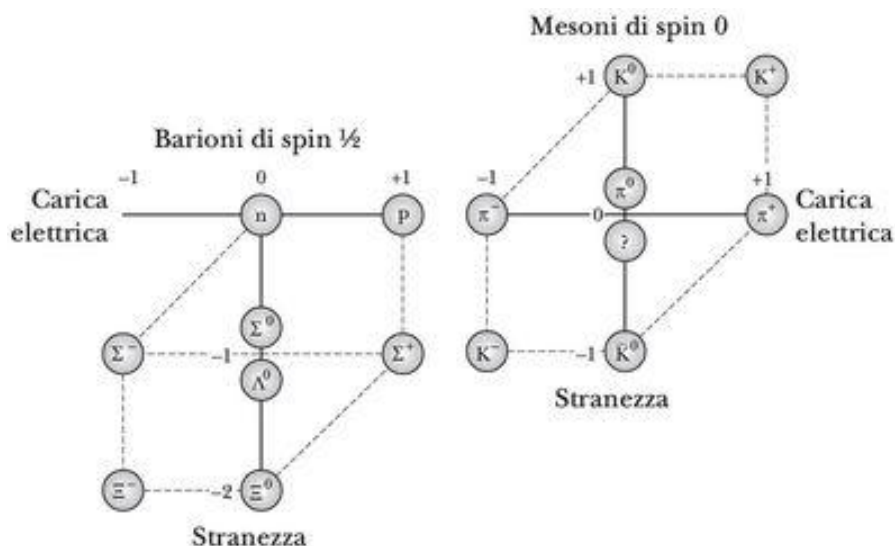


Figura 9 L'Ottuplice Via. Gell-Mann scoprì che poteva sistemare i barioni, che comprendono il neutrone (n) e il protone (p), e i mesoni in due ottetti corrispondenti a rappresentazioni a otto dimensioni del gruppo di simmetria globale SU(3). Ma nella rappresentazione dei mesoni c'erano solo sette particelle: mancava l'equivalente della Λ^0 nell'ottetto barionico. La particella mancante fu scoperta qualche mese dopo dal gruppo guidato da Luis Álvarez a Berkeley, e battezzata eta (η).

Operando una simile analisi sui mesoni, Gell-Mann capì che doveva includere l'anti- K_0 , ma che all'appello mancava comunque una particella: l'equivalente mesonico della lambda. Imbaldanzito, ipotizzò che dovesse esistere un ottavo mesone, di carica e stranezza nulle.

Gell-Mann aveva individuato una struttura di due «ottetti» di particelle fondata su una rappresentazione a otto dimensioni del gruppo di simmetria globale SU(3). La chiamò «Ottuplice Via», un ammiccante riferimento agli insegnamenti del Buddha sugli otto passi per raggiungere il Nirvana.¹⁵ L'articolo sull'Ottuplice Via fu

completato nel Natale del 1960 e pubblicato come *preprint* del Caltech all'inizio del 1961. La particella prevista da Gell-Mann per completare l'ottetto dei mesoni fu scoperta qualche mese dopo dall'équipe di Luis Álvarez a Berkeley, in California, e battezzata η (eta).

Gell-Mann lavorava da solo, ma non era l'unico teorico in cerca di una struttura. Yuval Ne'eman era un nuovo acquisto nel firmamento della fisica teorica. Se Gell-Mann era entrato a Yale alla tenera età di quindici anni, Ne'eman, nato a Tel Aviv, si era arruolato nella Haganah, l'organizzazione paramilitare ebraica durante il mandato britannico in Palestina, aveva comandato un battaglione di fanteria durante la guerra arabo-israeliana del 1948 ed era stato deputato direttore dei servizi segreti israeliani.

Aveva raggiunto il grado di colonnello nell'esercito, quando decise di proseguire gli studi e conseguire un dottorato in fisica. Moshe Dayan, capo di Stato Maggiore, accettò di nominarlo *attaché* della Difesa all'ambasciata israeliana di Londra, pensando che avrebbe potuto dedicarsi alla fisica nel tempo libero.

Ne'eman originariamente intendeva studiare relatività al King's College, ma scoprì ben presto che il traffico di Londra gli impediva, partendo dall'ambasciata a Kensington, di arrivare in tempo per seguire lezioni e seminari. Scelse quindi la fisica delle particelle all'Imperial College, dove fu indirizzato al fisico teorico di origine pachistana Abdus Salam.

Ne'eman studiava la sera e nei fine settimana. Si mise a cercare gruppi di simmetria che riuscissero a descrivere le particelle note e si ritrovò con cinque candidati, tra cui SU(3). Esaltato dalle potenzialità evocative di un gruppo che produceva il segno della Stella di David, Ne'eman scelse SU(3) e nel luglio del 1961 pubblicò la sua versione dell'Ottuplice Via.

Salam era inizialmente scettico, ma quando arrivarono sulla sua scrivania le bozze dell'articolo di Gell-Mann accantonò ben presto le sue riserve. Nonostante il leggero vantaggio alla partenza, Ne'eman fu battuto da Gell-Mann, che lo precedette nel dare l'articolo alle stampe (anche se quello di Ne'eman fu il primo a essere pubblicato su una rivista scientifica). Ma non rimase deluso: al contrario, era eccitato all'idea di trovarsi in così buona compagnia.

Nel giugno 1962 Gell-Mann e Ne'eman parteciparono a una conferenza di fisica delle particelle tenuta al Centro Europeo per la Ricerca Nucleare (CERN) di Ginevra. Entrambi ascoltarono attentamente i resoconti delle più recenti scoperte, una nuova tripletta di particelle in seguito chiamate Σ^* , con stranezza -1 , e un doppietto di particelle Ξ^* a stranezza -2 .

Ne'eman vide subito che le nuove particelle appartenevano a un'altra rappresentazione di $SU(3)$, stavolta in dieci dimensioni. Gli ci volle un attimo per capire che erano state trovate nove su dieci delle particelle implicate: quella mancante doveva avere carica negativa e un valore di stranezza di -3 .

Levò la mano per parlare, ma Gell-Mann era giunto alla stessa conclusione ed era seduto in una fila più avanzata. Fu dunque lui ad alzarsi e a predire l'esistenza di una nuova particella, che chiamò omega. L'omega fu scoperta nel gennaio del 1964.

La struttura era dunque stata trovata. Ma la spiegazione?

IDEE GIUSTE APPLICATE
AL PROBLEMA SBAGLIATO

Nel quale Murray Gell-Mann e George Zweig inventano i quark, mentre Steven Weinberg e Abdus Salam usano il meccanismo di Higgs per dare massa alle particelle W e Z (finalmente!).

Yoichiro Nambu era molto preoccupato.

Laureatosi all'Università imperiale di Tokyo nel 1942, avrebbe voluto occuparsi di fisica delle particelle, attratto dalla fama di Yoshio Nishina, Sin-Itiro Tomonaga e Hideki Yukawa, i fondatori della fisica particellare giapponese. Ma poiché a Tokyo non c'erano fisici importanti in questo campo, decise di dedicarsi alla fisica dello stato solido.

Nel 1949 lasciò Tokyo per una cattedra all'Università di Osaka. Tre anni più tardi fu invitato dall'Institute for Advanced Study di Princeton. Nel 1954 si trasferì all'Università di Chicago e quattro anni dopo divenne professore.

Nel 1956 assistette a un seminario di John Schrieffer sulla superconduttività. Questa nuova teoria, sviluppata dallo stesso Schrieffer assieme a John Bardeen e Leon Cooper, era un'elegante applicazione della meccanica quantistica che spiegava come mai certi materiali cristallini, se raffreddati al di sotto di una temperatura critica, perdono qualunque resistenza elettrica diventando superconduttori.

Le cariche dello stesso segno si respingono. Ciò nonostante, gli elettroni di un superconduttore subiscono una debole *attrazione* reciproca. Questo succede perché un elettrone libero, passando vicino a uno ione positivo del reticolo cristallino, lo smuove lievemente dalla sua posizione, distorto il reticolo. L'elettrone prosegue per il suo cammino, ma il reticolo continua a vibrare, e questa vibrazione produce un leggero eccesso di carica positiva, che attrae un secondo elettrone.

Il risultato di questa interazione è che coppie (dette «coppie di Cooper») costituite da elettroni di spin e quantità di moto opposte si muovono attraverso il reticolo in maniera coordinata; il loro moto è

mediato o facilitato dalle vibrazioni del reticolo. Ricordiamo che gli elettroni sono fermioni e, per il principio di Pauli, non possono occupare lo stesso stato quantistico. Le coppie di Cooper, al contrario, si comportano come bosoni, che sono meno vincolati. Non c'è alcuna restrizione al numero di coppie che possono occupare un dato stato quantistico, e a basse temperature queste possono «condensare», accumulandosi in un unico stato che può raggiungere dimensioni macroscopiche.¹ Le coppie di Cooper in questo stato non risentono di alcuna resistenza passando attraverso il reticolo: il risultato è la superconduttività.

Nambu era preoccupato perché la teoria non sembrava rispettare l'invarianza di gauge del campo elettromagnetico. In altre parole, non sembrava rispettare la conservazione della carica elettrica.

Accanitosi su questo problema, egli trasse vantaggio dalla sua formazione in fisica dello stato solido. Comprese che la teoria di Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) della superconduttività era un esempio di *rottura spontanea di simmetria* applicata al campo di gauge dell'elettromagnetismo.

Gli esempi di rottura della simmetria sono abbastanza comuni. Una matita in equilibrio sulla punta è perfettamente simmetrica, ma molto instabile. Quando si ribalta lo fa in una direzione particolare (per quanto all'apparenza casuale): si dice allora che la simmetria è rotta spontaneamente. Allo stesso modo, una biglia in bilico sul cocuzzolo di un sombrero è perfettamente simmetrica, ma instabile. La biglia rotola giù in una direzione specifica ma all'apparenza casuale, e si arresta in un punto della tesa. In realtà il ribaltamento della matita e la caduta della biglia sono dovuti a minuscole fluttuazioni dell'ambiente circostante, che fanno parte del «rumore» di fondo.

La rottura spontanea di simmetria riguarda lo stato di minima energia di un sistema, detto stato «di vuoto». Come per ogni materiale, ci si aspetta che anche un superconduttore abbia uno stato di vuoto, in cui gli ioni mantengono una posizione fissa nel reticolo e gli elettroni rimangono immobili. Tuttavia, la possibilità di moti coordinati di coppie di Cooper mediati dalle vibrazioni del reticolo crea uno stato di vuoto a energia *inferiore*. In questo caso la simmetria di gauge $U(1)$ dell'elettromagnetismo è rotta dalla presenza di un altro campo, i cui quanti sono rappresentati da coppie di Cooper. Le leggi che descrivono la dinamica degli elettroni nel materiale rimangono invarianti rispetto alla simmetria di gauge locale $U(1)$, ma lo stato di vuoto non lo è più.

Nambu si rese conto che, siccome le coppie di Cooper esistono in uno stato di energia più bassa, è necessario fornire energia per smembrarle: gli elettroni liberi così creati possederebbero un'energia aggiuntiva, pari alla metà di quella necessaria per separare una coppia. Questa energia aggiuntiva apparirebbe come massa. Nambu

rimase colpito dalle possibilità intraviste, che qualche anno dopo così riassunse:²

Che cosa accadrebbe se tutto l'universo fosse occupato da una sorta di materiale superconduttore, e noi ci vivessimo dentro? Dato che non possiamo osservare il vero vuoto, lo stato fondamentale [di energia minima] di questo mezzo rappresenterebbe il vuoto effettivo. In questo caso anche le particelle che sono prive di massa ... nel vuoto vero acquisterebbero una massa nel mondo reale.

Basta rompere la simmetria, si disse Nambu, e si otterranno particelle massive.

Nel 1961 Nambu pubblicò con l'italiano Giovanni Jona-Lasinio un articolo che delineava questo meccanismo. Per farlo funzionare i due autori dovettero postulare un campo di fondo che crei un «falso» vuoto. Nell'esempio riportato sopra, la matita si ribalta quando interagisce con il «rumore» di fondo rompendo la simmetria. Analogamente, rompere la simmetria in un campo quantistico richiede un «fondo» con cui interagire. Questo implica che lo spazio vuoto non è davvero vuoto, ma contiene energia nella forma di un campo quantistico onnipervasivo.

Nel loro modello, il falso vuoto forniva il «fondo» necessario per rompere la simmetria in una teoria delle interazioni forti contenente ipotetici protoni e neutroni a massa nulla. La rottura di simmetria aveva «acceso» le masse.

Ma non tutto filava così liscio. Il fisico Jeffrey Goldstone aveva studiato la rottura di simmetria, e lui pure aveva concluso che una delle sue conseguenze è la creazione di una nuova particella priva di massa.

In effetti anche Nambu e Jona-Lasinio erano incappati nello stesso problema, con il loro modello. Oltre a dare massa ai protoni e ai neutroni, la teoria prevedeva l'esistenza di particelle di massa nulla formate da nucleoni e antinucleoni. Nell'articolo i due autori cercavano di sostenere che in realtà esse avrebbero potuto acquisire una piccola massa, così da poter essere identificate con i pioni.

Le nuove particelle prive di massa furono chiamate *bosoni di Nambu-Goldstone*. Goldstone capì istintivamente che la creazione di queste particelle si sarebbe dimostrata un risultato generale, applicabile a tutte le simmetrie, e nel 1961 la elevò a principio, trasformandola nel *teorema di Goldstone*.

Naturalmente questi bosoni erano soggetti alle stesse obiezioni che gravavano sulle particelle prive di massa delle teorie di campo: qualunque nuova particella senza massa predetta dalla teoria avrebbe dovuto essere ubiqua quanto il fotone. Invece, guarda caso, queste

particelle aggiuntive non erano mai state osservate.

La rottura spontanea di simmetria prometteva una soluzione al problema delle particelle prive di massa nelle teorie di campo di Yang e Mills, ma al prezzo di introdurre ancora una volta nuove particelle prive di massa mai osservate. Si risolveva un problema e se ne creava un altro. Per progredire, bisognava trovare un modo di aggirare il teorema di Goldstone.

Gell-Mann e Ne'eman avevano saltato a piè pari la rappresentazione fondamentale del gruppo di simmetria globale $SU(3)$. Entrambi avevano scoperto che potevano sistemare il protone e il neutrone nella rappresentazione successiva, a otto dimensioni, applicata ai barioni. Le implicazioni erano piuttosto ovvie. Gli otto membri dell'ottetto barionico – compresi il protone e il neutrone – dovevano essere oggetti composti formati da tre o anche più particelle fondamentali, sconosciute alla scienza sperimentale. Era forse ovvia, ma si trattava di una congettura con conseguenze piuttosto scomode.

Nel 1963 Robert Serber, della Columbia University, cominciò a giocare con le combinazioni di tre (non meglio specificate) particelle fondamentali per creare i due ottetti dell'Ottuplice Via. In questo modello, ciascun membro dell'ottetto barionico era formato da combinazioni a tre a tre delle nuove particelle, e quello mesonico da combinazioni di una delle particelle fondamentali con una delle corrispettive antiparticelle. Quando, nel marzo di quell'anno, Gell-Mann arrivò alla Columbia per una serie di lezioni, Serber gli chiese un parere sulla sua idea.

La conversazione ebbe luogo durante la pausa pranzo, al circolo dei docenti della Columbia.

«Feci notare che si potevano prendere tre pezzi e costruire protoni e neutroni,» spiega Serber «mentre pezzi e anti-pezzi potrebbero fabbricare i mesoni. “Dunque” dissi “perché non prenderlo in considerazione?”».³

Gell-Mann fu sprezzante. Chiese a Serber quale avrebbe dovuto essere la carica elettrica di questa nuova tripletta di particelle fondamentali, un problema che Serber non si era posto.

«Era un'idea folle» ricorda Gell-Mann. «Afferrai un tovagliolo e feci due conti per mostrare che, se si volevano ottenere un protone e un neutrone di carica $+1$ e 0 , le particelle avrebbero dovuto avere cariche frazionarie ($-1/3$, $2/3$, cose del genere)».⁴

Anche Serber trovò l'idea spaventosa. Dodici anni appena dopo la scoperta dell'elettrone, Robert Millikan e Harvey Fletcher avevano condotto il famoso esperimento con le goccioline d'olio, in cui misuravano l'unità fondamentale di carica, trasportata da un elettrone.

Espressa in unità standard, la carica dell'elettrone è un numero complicato con tante cifre decimali ($1,602176487(40) \times 10^{-19}$ coulomb), ma ben presto si capì che tutte le particelle cariche hanno un valore della carica elettrica multiplo di questa unità di base. Mai una sola volta, nei cinquantaquattro anni successivi al radicamento dell'idea di unità di carica fondamentale, era stato ventilato il benché minimo indizio che potessero esistere particelle di carica inferiore.

Nella discussione che ne seguì, Gell-Mann chiamò le nuove particelle di Serber *quork*, una parola priva di senso, scelta apposta per sottolineare l'assurdità dell'idea. Serber immaginò che la parola fosse una storpiatura dell'inglese *quirk* («capriccio», «ghiribizzo»), visto che lo stesso Gell-Mann aveva usato proprio *quirk* per definire quell'eventualità uno strano ghiribizzo della natura.

Ma nonostante le spaventose conseguenze, la logica era inoppugnabile. Il gruppo di simmetria SU(3) richiedeva una rappresentazione fondamentale e il fatto che le particelle note si potessero sistemare nelle due configurazioni a otteetto era un forte indizio dell'esistenza di una tripletta fondamentale. Le cariche frazionarie erano problematiche ma, pensò Gell-Mann, se i «quork» fossero costretti a rimanere intrappolati o *confinati* per sempre all'interno degli adroni, questo spiegherebbe perché non siano mai state osservate sperimentalmente particelle con carica frazionaria.

Mentre le sue idee prendevano forma, gli capitò sotto gli occhi un passo del *Finnegan's Wake* di Joyce, che gli fornì una base per il nome di queste ridicole particelle:

*Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.*

«Perfetto!» dichiarò. «Tre *quark* fanno un protone, o un neutrone!». La parola non si pronunciava esattamente come il «quork» originale, ma ci andava abbastanza vicino. «E così scelsi quel nome. Ma è una battuta, una reazione alla pretenziosità del linguaggio scientifico». ⁵

Nel febbraio del 1964 Gell-Mann pubblicò un articolo di due pagine in cui spiegava l'idea. Chiamò i tre tipi di quark u, d e s: anche se l'articolo non lo dice esplicitamente, sono rispettivamente le iniziali di *up* (il quark «su», di carica $+2/3$), *down* («giù», con carica $-1/3$) e *strange* (il quark «strano», anch'esso di carica $-1/3$). I barioni sono formati da varie combinazioni di questi tre quark, i mesoni dalle combinazioni di un quark e un antiquark.

In questo schema, il protone consiste di due quark up e un quark down (uud), per una carica totale di $+1$. Il neutrone consiste di un

quark up e due quark down (udd), con carica totale nulla. Via via che il modello veniva elaborato, divenne chiaro che l'isospin è collegato al contenuto di quark u e d nella particella composta. L'isospin del protone e del neutrone si ottiene dividendo per due la differenza tra il numero di quark u e il numero di quark d.⁶ Per il neutrone questo dà un isospin di $1/2 \times (1-2)$, ovvero $-1/2$. «Ruotare» l'isospin del neutrone è allora equivalente a trasformare il quark d in un quark u, ottenendo un protone con isospin $1/2 \times (2-1)$, ovvero $+1/2$. La conservazione dell'isospin diventa quindi la conservazione del numero di quark u. La radioattività beta comporta la conversione di un quark d in quark u all'interno di un neutrone, con conseguente trasformazione del neutrone in protone, e l'emissione di una particella W^- , come mostrato in [figura 10](#).

Le particelle «strane» hanno valori di stranezza data semplicemente dall'opposto del numero di quark s presenti.⁷ Era adesso chiaro come un grafico che riporti la carica o l'isospin in funzione della stranezza descriva in realtà la composizione delle particelle in termini di quark, collocando combinazioni diverse in punti diversi del grafico ([fig. 11](#)).

Ancora una volta, Gell-Mann lavorava da solo ma non era l'unico teorico sulle tracce di una spiegazione di base. Tornato in Israele dalla Gran Bretagna un paio di anni prima, Ne'eman aveva elaborato assieme al matematico Haim Goldberg una proposta molto astratta riguardante una tripletta fondamentale, ma i due si erano ben guardati dal dichiarare che quelle fossero particelle «reali» con carica elettrica frazionaria.

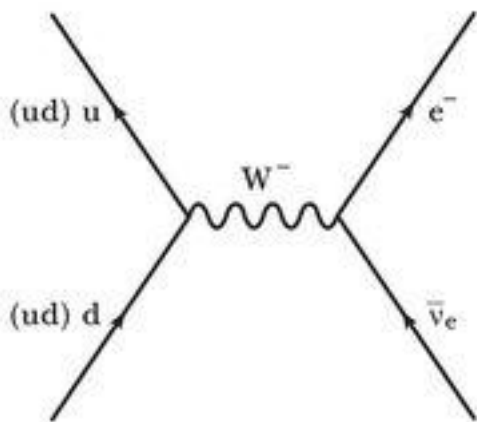


Figura 10 Il meccanismo del decadimento beta di un nucleo è ora spiegato in termini di decadimento debole di un quark d all'interno di un neutrone: il quark d decade in un quark u e trasforma il neutrone in protone, con l'emissione di una particella W^- virtuale.

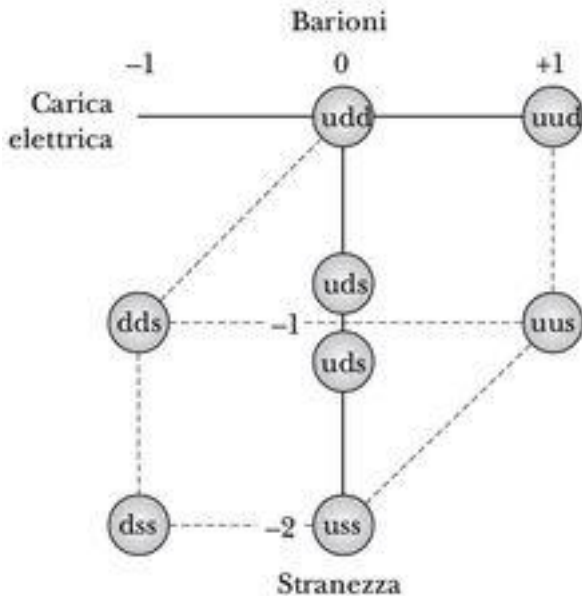


Figura 11 L'Ottuplice Via si può spiegare in maniera chiara in termini di varie combinazioni possibili di quark u, d e s, illustrate qui per l'ottetto barionico. La Λ^0 e la Σ^0 sono entrambe composte dai quark u, d e s, ma differiscono per il valore dell'isospin. La Λ^0 ha isospin 0, mentre la Σ^0 ha isospin 1. La differenza è dovuta alla diversa combinazione delle funzioni d'onda dei quark u e d. La Λ^0 ha una combinazione antisimmetrica ($ud-du$), mentre la Σ^0 ha una combinazione simmetrica ($ud+du$).

Negli stessi mesi in cui venivano pubblicate le ipotesi di Gell-Mann, George Zweig, già studente del Caltech, aveva sviluppato uno schema del tutto equivalente fondato su tre oggetti fondamentali che aveva battezzato «assi»: i barioni erano formati da «tris» d'assi, i mesoni da «coppie» di asso e anti-asso. Zweig lavorava come *post-doc* al CERN, e pubblicò le sue idee in un *preprint* datato gennaio 1964. Dopo aver letto l'articolo di Gell-Mann, si affrettò a elaborare il modello e a scrivere un secondo *preprint* di ottanta pagine, inviandolo alla prestigiosa «Physical Review».

L'articolo fu stroncato dalla revisione paritaria e non venne mai pubblicato.

A Gell-Mann, fisico già affermato e con molte scoperte rilevanti alle spalle, lo «scivolone» sui quark si poteva perdonare; Zweig, un giovane *post-doc*, non era in una posizione altrettanto fortunata. Quando, poco tempo dopo, cercò un incarico in una importante università, uno dei professori di maggiore anzianità, un rispettabile fisico teorico, dichiarò che il modello ad assi era opera di un ciarlatano. Il posto gli fu negato, e alla fine del 1964 Zweig fece ritorno al Caltech. Gell-Mann in seguito si adoperò per far riconoscere a Zweig il ruolo che gli spettava nella scoperta dei quark.

Il modello a quark era un elegante schema semplificativo, ma in

realtà non aveva alcuna base sperimentale. Gell-Mann non aiutava molto la sua causa, mantenendosi piuttosto cauto riguardo allo status delle nuove particelle. Non volendo rimanere invischiato in discussioni filosofiche sulla realtà di particelle che in linea di principio non si possono osservare, parlava dei quark come di entità «matematiche»; alcuni ne dedussero che non credeva nella loro realtà fisica, che cioè essi fossero oggetti realmente esistenti in grado di combinarsi e dar luogo a effetti fisici.

Zweig era più audace (o, secondo il punto di vista, più imprudente). Nel suo secondo *preprint* aveva dichiarato: «C'è anche una piccola probabilità che il modello sia una approssimazione della natura più accurata di quanto crediamo, e che gli assi a carica frazionaria abbondino in realtà dentro di noi».⁸

Philip Anderson non credeva al teorema di Goldstone. Molti esempi pratici nella fisica dello stato solido mostravano che non sempre in caso di rottura spontanea di simmetria di gauge si producono bosoni di Nambu-Goldstone. I casi di simmetria rotta erano all'ordine del giorno, ma i fisici dello stato solido non erano per questo travolti da valanghe di particelle a massa nulla simili ai fotoni. Non c'erano particelle a massa nulla nei superconduttori, per esempio. Qualcosa non quadrava.

Nel 1963 Anderson suggerì che i problemi con cui stavano lottando i teorici dei campi potessero in qualche modo risolversi da sé:⁹

È probabile che, considerando l'analogia dei superconduttori, la via sia ora aperta ... senza alcuna difficoltà riguardo alla massa nulla dei bosoni di Yang-Mills o di [Nambu-] Goldstone. Questi due tipi di bosoni sembrano infatti in grado di «cancellarsi a vicenda», lasciando solo bosoni di massa finita.

Possibile che fosse davvero così semplice? Era uno di quei casi in cui due errori si compensano? L'articolo di Anderson suscitò una piccola controversia. Mentre sulla stampa scientifica infuriavano argomentazioni pro e contro, un certo numero di fisici prendeva accuratamente nota.

Ne seguì una serie di articoli che descrivevano in dettaglio meccanismi di rottura della simmetria in cui i vari bosoni privi di massa si «cancellavano» effettivamente l'un l'altro, lasciando solo particelle con massa. Furono pubblicati indipendentemente da Robert Brout e François Englert in Belgio, da Peter Higgs all'Università di Edinburgo e da Gerald Guralnik, Carl Hagen e Tom Kibble all'Imperial College di Londra.¹⁰ Si parla comunemente di *meccanismo di Higgs* (o, in alcuni ambienti più attenti alla democrazia della scoperta, di

«meccanismo di Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble (BEHHGK)»).

La cosa funziona così. Una particella priva di massa e di spin 1 (un bosone) viaggia alla velocità della luce e ha due «gradi di libertà»: la sua ampiezza d'onda, cioè, può oscillare in due direzioni, perpendicolari (ossia, trasverse) a quella di volo. Se la particella si muove in direzione dell'asse z , per esempio, l'ampiezza dell'onda può oscillare nelle direzioni x e y (destra-sinistra, alto-basso). Per il fotone i due gradi di libertà sono associati agli stati di polarizzazione circolare destrorsa e sinistrorsa, che possono essere combinati per dare quelli più familiari di polarizzazione lineare orizzontale (direzione x) e verticale (direzione y) della luce. Per la luce non esiste una terza possibile direzione di polarizzazione.

Per cambiare questo stato è necessario introdurre un campo di fondo, spesso chiamato *campo di Higgs*, che rompa la simmetria.¹¹ Il campo di Higgs è caratterizzato dalla forma della sua *curva di energia potenziale*.

Il concetto di curva di energia potenziale è piuttosto immediato. Immaginiamo un pendolo che dondola avanti e indietro; nel corso dell'oscillazione sale e rallenta fino a fermarsi, prima di ridiscendere e tornare indietro. Nel punto in cui si ferma tutta l'energia del suo moto (energia cinetica) si è convertita in energia potenziale immagazzinata nel pendolo. Durante il moto di discesa l'energia potenziale viene di nuovo liberata e trasformata in energia cinetica, facendo accelerare il pendolo. Nel punto più basso dell'oscillazione, quello in cui il pendolo punta verso il basso, l'energia cinetica è massima e quella potenziale è nulla.

Se tracciamo un grafico dell'energia potenziale in funzione dello spostamento del pendolo dalla verticale, per piccoli angoli otteniamo una parabola (fig. 12a). Il minimo di questa curva è chiaramente in corrispondenza del punto in cui lo spostamento del pendolo è nullo.

La curva di energia potenziale del campo di Higgs è lievemente diversa (fig. 12b): in luogo dello spostamento dalla posizione di equilibrio, in ascissa si rappresenta il valore del campo stesso. Al fondo della curva c'è una piccola gobba, simile al cocuzzolo di un sombrero o alla rientranza sul fondo di una bottiglia di vino. La presenza della gobba costringe la simmetria a rompersi: quando si raffredda e perde energia potenziale, proprio come la matita in bilico sulla punta, il campo cade in direzione casuale in un avvallamento della curva (che in realtà è tridimensionale). Ma questa volta il punto di minimo della curva non corrisponde a un valore nullo per il campo (i fisici parlano di un «valore di aspettazione» del campo non nullo). Si tratta di un «falso» vuoto, nel senso che il vuoto non è completamente tale: contiene infatti un valore non nullo del campo di Higgs.

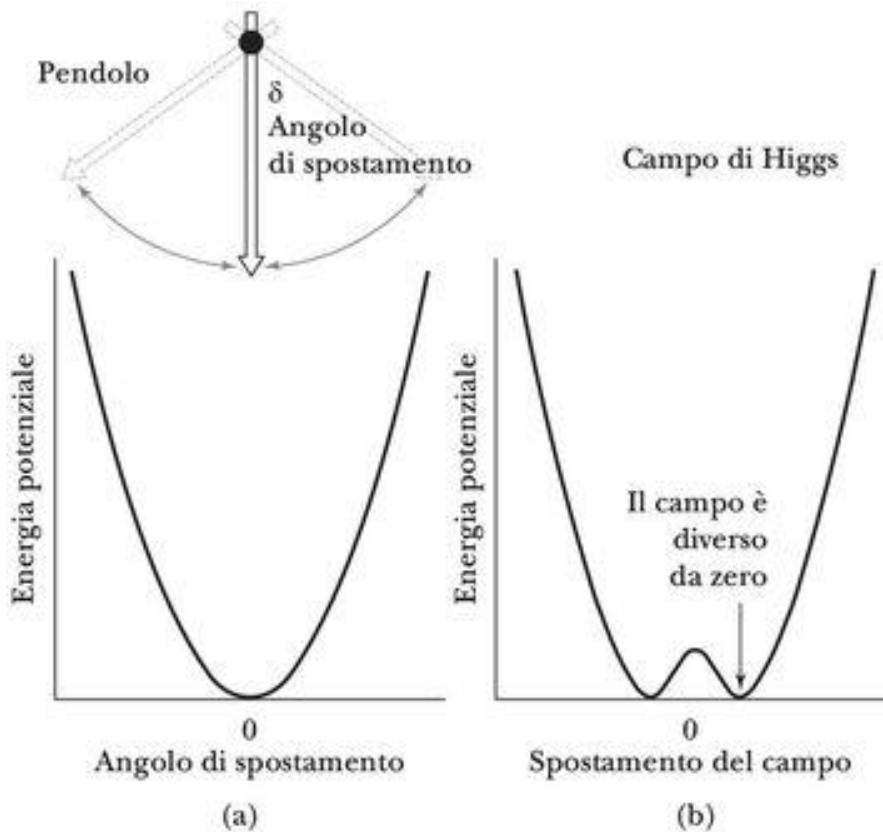


Figura 12a / Figura 12b Nel caso di un pendolo semplice privo di attrito (a), per piccoli angoli la curva dell'energia potenziale ha la forma di una parabola, e lo zero dell'energia potenziale corrisponde a uno spostamento nullo del pendolo dalla verticale. L'energia potenziale del campo di Higgs (b) ha invece una forma diversa. Qui lo zero dell'energia potenziale corrisponde a uno spostamento finito (del campo stesso) o, come dicono i fisici, a un valore di aspettazione nel vuoto non nullo.

La rottura di simmetria crea un bosone di Nambu-Goldstone privo di massa. Questo può essere ora «assorbito» dal bosone a massa nulla e spin 1 per creare il terzo grado di libertà (avanti-indietro). L'onda associata al campo può adesso oscillare in tutte e tre le direzioni, compresa quella di volo. La particella acquista «spessore» (fig. 13) .

Nel meccanismo di Higgs, l'acquisto della tridimensionalità opera come un freno. La particella viene tanto più rallentata, quanto più forte è la sua interazione con il campo di Higgs.

Il fotone non interagisce con il campo di Higgs e continua a viaggiare indisturbato alla velocità della luce: rimane privo di massa. Le particelle che invece interagiscono con il campo acquistano uno spessore, aumentano la propria energia e rallentano, a causa del campo stesso che le frena come una melassa. Le interazioni della particella con il campo si manifestano in una resistenza

all'accelerazione.¹²

Vi ricorda qualcosa?

La massa inerziale di un oggetto ne misura la resistenza all'accelerazione. Istintivamente associamo la massa inerziale con la quantità di materia di cui è fatto l'oggetto: più «roba» c'è, più è difficile accelerarlo. Il meccanismo di Higgs rovescia la logica. *Ora interpretiamo come massa (inerziale) della particella il livello di resistenza all'accelerazione causato dal campo di Higgs.*



Figura 13 a) Un bosone di massa nulla si muove alla velocità della luce e ha solo due «gradi di libertà» trasversali, destra/sinistra (x) e alto/basso (y). b) Interagendo con il campo di Higgs, la particella può assorbire un bosone di Nambu-Goldstone e acquisire un terzo grado di libertà, avanti-indietro (z). La particella acquista uno «spessore» e rallenta: questa resistenza all'accelerazione è la massa.

Il concetto di massa è svanito in una nuvoletta di logica, sostituito da interazioni tra il campo di Higgs e particelle altrimenti prive di massa.

Il meccanismo di Higgs non fece immediatamente proseliti. Lo stesso Peter Higgs ebbe inizialmente qualche difficoltà a far pubblicare l'articolo, che fu rifiutato dalla rivista «Physics Letters». Anni dopo Higgs scrisse:¹³

Ero indignato. Ero convinto che ciò che avevo dimostrato potesse avere conseguenze importanti per la fisica delle particelle. In seguito il mio collega Squires, che aveva trascorso l'agosto del 1964 al CERN, mi disse che i teorici non avevano colto il punto del mio lavoro. In retrospettiva, la cosa non è sorprendente: nel 1964 ... la teoria dei campi era fuori moda.

Higgs apportò qualche correzione all'articolo e lo inviò alla «Physical Review Letters», che lo mandò a Nambu per la revisione paritaria. Nambu chiese a Higgs di esprimersi sul rapporto tra il suo

articolo e quello appena pubblicato sulla stessa rivista (31 agosto 1964) da Brout e Englert. Higgs non era a conoscenza del lavoro dei due, che riguardava lo stesso problema, e citò il loro articolo in una nota aggiunta a piè di pagina. Aggiunse anche un paragrafo finale, in cui attirava l'attenzione sulla possibilità di «multipletti incompleti di bosoni scalari e vettoriali»,¹⁴ un riferimento piuttosto criptico alla possibilità di un altro bosone pesante a spin nullo, il quanto del campo di Higgs.

Sorprendentemente, forse, il meccanismo di Higgs ebbe un impatto immediato piuttosto scarso su coloro che ne avrebbero tratto maggior beneficio.

Nato nel 1929 a Newcastle, in Inghilterra, Peter Higgs si laureò al King's College di Londra nel 1950, e quattro anni dopo conseguì il dottorato. In seguito fu per un certo periodo all'Università di Edimburgo, allo University College e all'Imperial College di Londra. Nel 1960 tornò a Edimburgo, dove ottenne una cattedra in Fisica matematica. Nel 1963 sposò Jody Williamson, come lui attivista nella campagna per il disarmo nucleare.

Nell'agosto del 1965 portò Jody a Chapel Hill, per un periodo sabbatico all'Università del North Carolina. Di lì a qualche mese nacque il loro primo figlio, Christopher. Poco dopo Higgs ricevette da Freeman Dyson l'invito a tenere un seminario a Princeton sul meccanismo che portava il suo nome. Higgs era timoroso riguardo alla probabile accoglienza che avrebbe avuto la sua teoria in quelli che ormai erano famosi come «seminari tirassegno», ma quando tenne le sue lezioni, nel marzo 1966, ne uscì incolume. Pauli era morto nel dicembre del 1958, tuttavia è interessante chiedersi se le argomentazioni di Higgs avrebbero cambiato il suo atteggiamento nei confronti delle proposte avanzate con esito nefasto da Yang solo dodici anni prima.

Higgs colse l'occasione per tenere un seminario anche a Harvard, dove era stato invitato da tempo. Anche qui l'uditorio era scettico, e uno dei teorici presenti ammise in seguito che, come i colleghi, non vedeva l'ora «di distruggere questo idiota che pensava di aggirare il teorema di Goldstone».

Nell'uditorio era presente anche Glashow, che però sembrava aver già dimenticato i suoi precedenti tentativi di sviluppare una teoria unificata elettrodebole, una teoria che prevedeva particelle W^+ , W^- e Z_0 a massa nulla anziché pesanti. «La sua amnesia purtroppo durò per tutto il 1966» scrive Higgs.¹⁵ Per correttezza nei confronti di Glashow, Higgs si concentrò sull'applicazione del proprio meccanismo alla forza forte.

Ma Glashow non fece due più due. Sarebbe stato il suo ex compagno di studi Steven Weinberg (e, indipendentemente, Abdus Salam) a fare il collegamento.

Dopo la laurea alla Cornell University nel 1954, Weinberg aveva proseguito gli studi all'Istituto Niels Bohr di Copenaghen, tornando poi a Princeton dove conseguì il dottorato nel 1957. Completato il *post-doc* alla Columbia di New York e al Lawrence Radiation Laboratory in California, ottenne una cattedra a Berkeley. Nel 1966 prese un congedo come *visiting lecturer* a Harvard, e l'anno successivo divenne *visiting professor* al MIT.

Weinberg aveva trascorso un paio d'anni studiando gli effetti della rottura spontanea di simmetria nelle interazioni forti descritte da una teoria di gauge $SU(2) \times SU(2)$. Come avevano scoperto Nambu e Jona-Lasinio qualche anno prima, il risultato della rottura di simmetria era che protoni e neutroni acquistano una massa. Weinberg era convinto che i bosoni di Nambu-Goldstone così creati potessero essere identificati, in una certa approssimazione, con i pioni. All'epoca questo sembrava aver senso e, lungi dal tentare di aggirare il teorema di Goldstone, Weinberg era stato fino a quel momento ben contento di queste nuove particelle previste.

Adesso però si era reso conto che questa tattica non avrebbe portato frutti. E gli venne un'altra idea:¹⁶

Un giorno d'autunno del 1967, mi pare mentre ero in macchina diretto al MIT, mi venne in mente che stavo applicando le idee giuste al problema sbagliato.

Weinberg aveva cercato di applicare il meccanismo di Higgs all'interazione forte, e ora si rendeva conto che le strutture matematiche che aveva cercato di usare per la forza forte erano precisamente ciò che serviva per risolvere i problemi della forza debole e dei suoi bosoni pesanti. «Santo cielo,» si disse «ma questa è la risposta per le interazioni deboli!». ¹⁷

Weinberg sapeva bene che, se le masse delle particelle W_+ , W_- e Z_0 venivano aggiunte «a mano», come nella teoria elettrodebole $SU(2) \times U(1)$ di Glashow, il risultato era una teoria non rinormalizzabile. Si chiese dunque se, rompendo la simmetria con il meccanismo di Higgs, oltre a dotare di massa le particelle ed eliminare gli indesiderati bosoni di Nambu-Goldstone, si sarebbe ottenuta una teoria almeno in linea di principio rinormalizzabile.

Rimaneva il problema delle correnti neutre, le interazioni dovute alla particella Z_0 di cui non c'era alcuna prova sperimentale. Weinberg decise di eludere il problema restringendo la sua teoria ai leptoni:

elettroni, muoni, neutrini. Non si fidava più troppo degli adroni, le particelle soggette alla forza forte, e specialmente delle particelle strane, che erano diventate il terreno principale di esplorazione sulle interazioni deboli.

Le correnti neutre sarebbero state comunque previste ma, in un modello ristretto ai leptoni, avrebbero coinvolto i neutrini. Il neutrino si era già dimostrato abbastanza difficile da rivelare di per sé: forse Weinberg pensò che un'eventuale scoperta di correnti neutre che lo implicassero avrebbe presentato difficoltà sperimentali insormontabili, dandogli la possibilità di fare previsioni senza troppa tema di smentite.

Nel novembre 1967 Weinberg pubblicò un articolo in cui descriveva in dettaglio una teoria unificata elettrodebole dei leptoni: si trattava di una teoria $SU(2) \times U(1)$ ridotta alla simmetria $U(1)$ dell'elettromagnetismo ordinario attraverso la rottura spontanea di simmetria, che dava massa alle particelle W_+ , W_- e Z_0 lasciando il fotone privo di massa. Weinberg non riuscì a dimostrare che la teoria era rinormalizzabile, benché ne fosse convinto.

Nel 1964 Higgs aveva accennato alla possibilità dell'esistenza di un bosone di Higgs, senza però legarla ad alcuna specifica forza o teoria. Nella sua teoria elettrodebole Weinberg aveva trovato necessario introdurre un campo di Higgs con quattro componenti: tre di queste dovevano servire a dar massa alle particelle W_+ , W_- e Z_0 ; la quarta sarebbe apparsa come una particella fisica, il bosone di Higgs. Ciò che prima era una possibilità matematica diventava ora una previsione. Weinberg aveva addirittura stimato l'intensità dell'accoppiamento tra il bosone di Higgs e l'elettrone, avvicinandolo sempre più al ruolo di «vera» particella.

In Gran Bretagna, Abdus Salam era venuto a conoscenza del meccanismo di Higgs grazie a Tom Kibble. Avendo lavorato in precedenza su una teoria elettrodebole $SU(2) \times U(1)$, si rese immediatamente conto delle possibilità offerte dalla rottura spontanea di simmetria. Quando vide un *preprint* dell'articolo che applicava la teoria ai leptoni, scoprì che lui e Weinberg erano arrivati indipendentemente allo stesso modello. Salam decise di non pubblicare il suo lavoro fino a quando non fosse riuscito a includere gli adroni in maniera soddisfacente. Ma per quanto si sforzasse, non era in grado di superare l'ostacolo delle correnti neutre. Come Weinberg, anche Salam era convinto che la teoria fosse rinormalizzabile, ma non riuscì a dimostrarlo. Allo stesso modo, nessuno dei due riuscì a predire la massa del bosone di Higgs.

Nessuno, o quasi, se ne accorse. I pochi che reagirono lo fecero in

modo tendenzialmente critico. Il problema della massa era stato risolto con un «gioco di specchi», un trucco che tirava in ballo un campo ipotetico, il quale a sua volta implicava l'esistenza di un ipotetico bosone. Sembrava che i fisici teorici si divertissero a giocare con campi e particelle, seguendo regole oscure che capivano in pochi.

I fisici delle particelle decisero di ignorarli e continuare a fare scienza.

Nel quale Gerard 't Hooft dimostra che le teorie di Yang-Mills si possono rinormalizzare, mentre Murray Gell-Mann e Harald Fritzsch elaborano una teoria delle interazioni forti basata sul colore dei quark.

A parte l'assurdità della carica elettrica frazionaria, il modello a quark presentava un altro grosso problema. In quanto costituenti di «particelle di materia» come i protoni e i neutroni, i quark dovevano essere fermioni, con spin semintero. Questo significava che, per il principio di Pauli, gli adroni non potevano contenere più di un quark in ciascuno dei possibili stati quantici.

Ma secondo il modello a quark il protone doveva consistere di due quark u e un quark d. Era un po' come dire che un orbitale atomico deve contenere due elettroni con spin all'insù e uno con spin all'ingiù: non è possibile, le proprietà di simmetria della funzione d'onda lo proibiscono; ci possono essere solo due elettroni, con spin uno all'insù e uno all'ingiù, non c'è spazio per un terzo. Allo stesso modo, se i quark dovevano essere fermioni, non ci poteva essere spazio per due quark u nel protone.

Il problema era stato individuato poco dopo la pubblicazione del primo articolo di Gell-Mann sui quark. Il fisico Oscar Greenberg nel 1964 aveva ipotizzato che i quark fossero in realtà *parafermioni*, cioè che fossero distinguibili per altri «gradi di libertà» oltre a quello individuato dai «numeri quantici» u, d, s. Esisterebbero diversi tipi di quark u, per esempio, il che permetterebbe a due di loro di trovarsi allegramente insieme in un protone senza occupare lo stesso stato quantistico.

Ma anche questo modello presentava dei problemi. La soluzione di Greenberg apriva ai barioni la possibilità di comportarsi come bosoni, e quindi di condensare in un unico stato quantistico macroscopico, come il laser nel caso della luce. Non era accettabile.

Yoichiro Nambu tentò con uno schema simile, ipotizzando prima che esistessero due, poi tre diversi tipi di quark u, d e s rispettivamente. Moo-Young Han, un giovane dottorando della Syracuse University gli scrisse nel 1965 esponendogli in dettaglio

l'idea. Insieme scrissero un articolo che uscì quello stesso anno.

Non si trattava tuttavia di una semplice estensione della teoria dei quark di Gell-Mann. Han e Nambu introdussero un nuovo tipo di «carica» dei quark, diversa da quella elettrica. I due quark u del protone erano ora distinguibili per questa nuova proprietà, il che evitava la violazione del principio di esclusione. Secondo gli autori la forza che tiene insieme i quark nel nucleone sarebbe fondata su una simmetria locale $SU(3)$, da non confondere con la simmetria globale alla base dell'Ottuplice Via.

I due decisero anche di cogliere l'occasione per liberare il modello a quark della carica elettrica frazionaria, introducendo sovrapposizioni di triplette di $SU(3)$ con cariche $+1$, 0 e -1 oltre alla carica elettrica.

Nessuno ci fece molto caso. Han e Nambu avevano fatto un grande passo verso la soluzione definitiva, ma il mondo non era ancora pronto.

Glashow tornò ai problemi della sua teoria elettrodebole $SU(2) \times U(1)$ nel 1970, in compagnia di due assistenti *post-doc*, John Iliopoulos e Luciano Maiani. Glashow aveva incontrato Iliopoulos al CERN ed era rimasto colpito dai suoi tentativi di trovare una teoria rinormalizzabile delle interazioni deboli. Maiani era arrivato a Harvard con alcune idee curiose sull'intensità delle interazioni deboli. I tre si erano resi conto che i loro interessi convergevano.

Nessuno di loro era a conoscenza dell'articolo di Weinberg del 1967 che applicava la rottura spontanea di simmetria e il meccanismo di Higgs a una teoria elettrodebole dei leptoni.

Glashow, Iliopoulos e Maiani ripresero a lottare con la teoria. Aggiungere a mano le masse delle particelle W e Z produceva dispettose divergenze nelle formule, che rendevano la teoria non rinormalizzabile. E poi c'era il problema delle correnti neutre. Per esempio, la teoria prevedeva che un mesone K neutro decadesse emettendo un bosone Z_0 , cambiando il valore totale della stranezza e producendo una coppia di muoni – un caso di corrente neutra. Ma di questa modalità di decadimento non c'era alcuna evidenza sperimentale. Anziché abbandonare del tutto l'ipotesi della Z_0 , i tre fisici cercarono di capire come mai questo decadimento fosse soppresso.

Nel 1962 era stato scoperto il neutrino muonico, che diventava così il quarto leptone dopo l'elettrone, il neutrino elettronico e il muone. I tre fisici cominciarono ad armeggiare con il modello a quattro leptoni e tre quark, aggiungendo inizialmente altri leptoni. Ma Glashow nel 1964 aveva pubblicato un articolo in cui ipotizzava l'eventuale esistenza di un quarto quark, che aveva battezzato *charm* («incanto»).

Questo sembrava avere più senso. La natura avrebbe certamente preteso un equilibrio tra il numero di leptoni e quello di quark: un modello a quattro leptoni e quattro quark aveva una simmetria molto più gradevole.

I tre studiosi aggiunsero dunque al miscuglio un quarto quark, una versione pesante del quark u con carica $+2/3$. Così facendo, avevano eliminato le correnti neutre.

Le correnti neutre possono prodursi tramite decadimenti che coinvolgono la Z_0 , oppure attraverso decadimenti più complessi che comportano l'emissione di entrambe le particelle W_+ e W_- . In entrambi i casi il risultato finale è lo stesso: due muoni di carica opposta μ_+ e μ_- . Il meccanismo di decadimento del secondo tipo è illustrato in [figura 14a](#). Qui un mesone K neutro (costituito da un quark d e un antiquark s) emette una particella W_- virtuale, e il quark d (carica $-1/3$) si trasforma in un quark u (carica $+2/3$). Il W_- virtuale decade in un muone e in un antineutrino muonico.

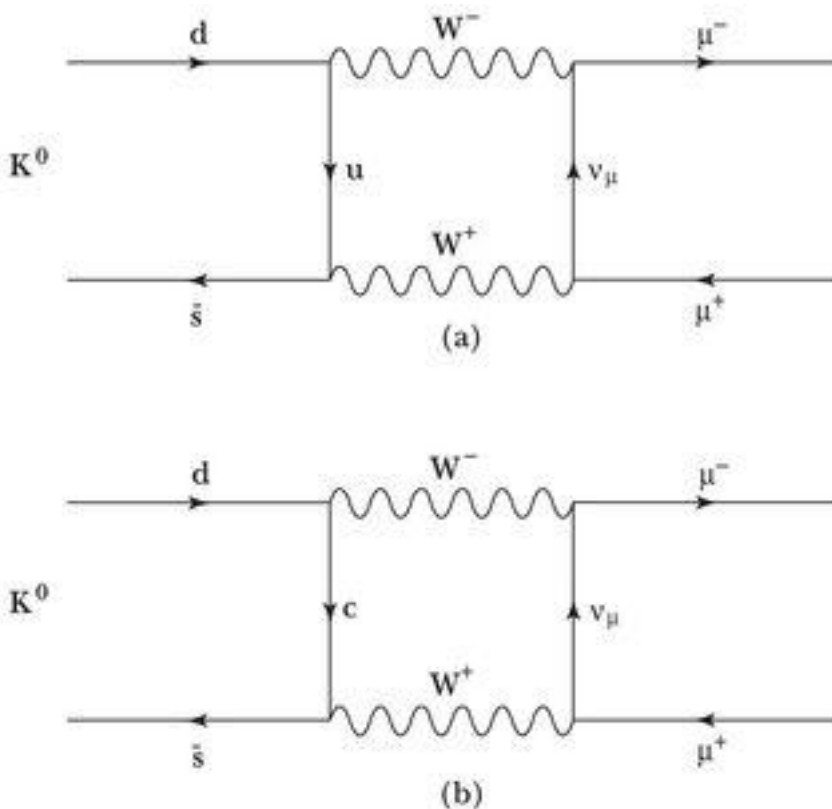


Figura 14a / Figura 14b a) Un mesone K neutro decade in due muoni attraverso un meccanismo complesso che comporta l'emissione di particelle W_+ e W_- . Non c'è variazione netta di carica e quindi si tratta di corrente neutra. b) Il percorso di decadimento definito in (a) è cancellato da questo percorso alternativo che coinvolge il quark charm.

Si può poi pensare che il quark u così prodotto emetta una particella W^+ virtuale, trasformandosi nel processo in un quark s . Il W^+ decade a sua volta in un muone positivo e in un neutrino muonico. Un processo di questo tipo si chiama in gergo «contributo a un *loop*» al risultato finale, che è il decadimento di un mesone K neutro in una coppia di muoni di carica opposta.

Non c'era, in linea di principio, alcun motivo perché questo esempio di corrente neutra non dovesse essere osservato sperimentalmente. Tuttavia, le modalità di decadimento più frequenti dei mesoni K neutri producono pioni, non muoni. Per qualche motivo, il «percorso» di decadimento in muoni era soppresso. Glashow, Iliopoulos e Maiani si resero conto che un diagramma analogo con il quark charm al posto del quark u avrebbe sistemato magicamente tutto (fig. 14b). Una differenza di segno tra questi due possibili percorsi di decadimento significava che i due in pratica si elidono a vicenda. Come una lepore sorpresa dagli abbaglianti, il mesone K non sa decidere da che parte saltare fino a quando è troppo tardi.

Era una soluzione pulita. I mesoni K , il principale terreno di esplorazione per gli studi sperimentali sulle interazioni deboli, avrebbero dovuto esibire correnti neutre, ma non lo facevano quasi mai a causa delle modalità alternative di decadimento attraverso il quark charm.

Elettrizzati dalla scoperta, i fisici si infilarono in un'auto e si precipitarono al MIT diretti all'ufficio di Francis Low, un altro fisico che stava lavorando al problema. Li raggiunse anche Weinberg, e tutti insieme discussero la validità di questo nuovo «meccanismo GIM» (Glashow-Iliopoulos-Maiani).

Ciò che seguì fu un caso clamoroso di mancanza di comunicazione.

Nelle menti dei teorici riuniti nell'ufficio di Low c'erano quasi tutti gli ingredienti per una teoria unificata delle interazioni deboli ed elettromagnetiche. Weinberg aveva trovato il modo di applicare la rottura spontanea di simmetria attraverso il meccanismo di Higgs a una teoria $SU(2) \times U(1)$ per i leptoni, permettendo alle masse dei mediatori di forza di essere calcolate anziché inserite a mano. Glashow, Iliopoulos e Maiani avevano trovato una soluzione potenziale al problema delle correnti neutre nei decadimenti deboli delle particelle strane, che prometteva di estendere la teoria $SU(2) \times U(1)$ alle interazioni deboli degli adroni. Ma inserivano ancora le masse dei mediatori a mano, combattendo contro i termini divergenti.

Glashow, Iliopoulos e Maiani non sapevano dell'articolo del 1967 di Weinberg, e Weinberg non disse nulla al riguardo. In seguito confessò che all'epoca aveva una sorta di «blocco psicologico» nei confronti dei suoi studi precedenti, in particolare riguardo al problema della rinormalizzabilità della teoria elettrodebole.¹ Inoltre non vedeva di

buon occhio l'idea del quark charm. Quello che proponevano Glashow, Iliopoulos e Maiani non era solo una nuova particella, parte di una famiglia allargata di particelle di forse dubbia rilevanza, bensì una nuova generazione di mesoni e barioni «incantati». Se il quark charm esisteva davvero, l'Ottuplice Via sarebbe stata semplicemente un sottoinsieme di una rappresentazione molto più estesa, con molti elementi «incantati».

Era un bel boccone da mandar giù, solo per spiegare l'assenza di correnti neutre nei decadimenti deboli delle particelle strane. «Naturalmente non tutti credevano nella previsione dell'esistenza di adroni con charm» ricorda Glashow.²

Non era possibile alcun progresso, almeno finché qualcuno non fosse riuscito a dimostrare che la teoria elettrodebole di Weinberg e Salam poteva essere rinormalizzata.

Martinus Veltman aveva studiato matematica e fisica all'Università statale di Utrecht, dove nel 1966 aveva ottenuto una cattedra. Nel 1968 aveva cominciato ad affrontare il problema della rinormalizzazione delle teorie di Yang-Mills.

All'epoca, la fisica delle alte energie non era un argomento di ricerca molto popolare in Olanda, il che portava con sé una certa sensazione di isolamento. Ma questo faceva buon gioco a Veltman, il quale così non si trovava a dover giustificare la scelta di argomenti di ricerca fuori moda.

All'inizio del 1969 gli fu affidato Gerard 't Hooft, un giovane studente che doveva scrivere una tesi di pre-dottorato (detta colloquialmente *scriptie*). Veltman non osò farlo lavorare sulle teorie di Yang-Mills perché lo riteneva un argomento troppo rischioso, che difficilmente lo avrebbe aiutato a trovare un posto. Ma, una volta ultimata la tesi, 't Hooft fu ammesso agli studi di dottorato dall'università, ed espresse il desiderio di continuare a lavorare con Veltman.

Veltman continuava a ritenere che le teorie di Yang-Mills fossero irte di pericoli. Aveva fatto progressi notevoli sulla rinormalizzazione, ma il problema rimaneva estremamente coriaceo. Gerard 't Hooft era invece fortemente convinto che questo si sarebbe dimostrato un terreno fertile per la sua tesi di dottorato. Veltman provò a suggerirgli un altro argomento, ma 't Hooft fu irremovibile.

I due formavano una coppia alquanto improbabile: da una parte Veltman, un omone dal carattere pragmatico, fiero dei propri risultati e indifferente alla mancanza di interesse da parte della comunità fisica; dall'altra 't Hooft, mingherlino e alquanto schivo ma dotato, dietro la maschera della modestia, di una mente di singolare acume.

Nel suo libro del 1997 *In Search of the Ultimate Building Blocks* [«In cerca dei mattoni fondamentali»] 't Hooft presenta Veltman con un aneddoto. Un giorno Veltman entrò in un ascensore già pieno; quando venne premuto il pulsante, l'allarme avvertì che si era superato il massimo carico consentito. Tutti gli occhi si girarono verso Veltman, piuttosto largo di girovita e ultimo entrato. Mentre chiunque altro avrebbe borbottato delle scuse imbarazzate uscendo dall'ascensore, Veltman non ne volle sapere. Conosceva il principio di equivalenza di Einstein, alla base della relatività generale: una persona in caduta libera non sente il proprio peso. Sapeva che cosa doveva fare.

«Al mio “sì”, premete!» esclamò.³

Spiccò quindi un balzo verso l'alto e gridò: «Sì!».

Qualcuno premette il pulsante e l'ascensore cominciò a salire. Quando Veltman toccò di nuovo il pavimento, l'ascensore aveva già raggiunto abbastanza velocità da rimanere in moto. In quell'ascensore c'era anche 't Hooft.

Un giorno dell'autunno o inverno 1970-71, Veltman e 't Hooft stavano camminando tra gli edifici del campus universitario. «Non mi importa che cosa e in che modo,» disse Veltman «ma quel che ci serve è avere almeno una teoria rinormalizzabile con bosoni vettori massivi, e che sia simile o no alla natura non ha alcuna rilevanza: sono dettagli di cui si occuperà poi qualche fanatico di modelli. In ogni caso, tutti i modelli possibili sono già stati pubblicati».⁴

«So come fare» rispose 't Hooft sottovoce.

Conoscendo anche troppo bene le persistenti difficoltà del problema, e sapendo che altri – tra cui Richard Feynman – ci avevano provato senza riuscirci, Veltman fu molto sorpreso dalla dichiarazione di 't Hooft. Per poco non andò a sbattere contro un albero.

«Come hai detto?» gli chiese.

«Penso di saperlo fare» ribadì 't Hooft.

Veltman lavorava su quel problema da talmente tanto tempo da non poter credere che la soluzione fosse semplice come stava prospettando 't Hooft. Era comprensibilmente scettico.

«Scrivila, e vediamo» concluse.

Ma 't Hooft aveva appreso della rottura spontanea di simmetria a una scuola estiva a Cargèse, in Corsica, nel 1970. Nel suo primo articolo, pubblicato alla fine dello stesso anno, aveva dimostrato che le teorie di Yang-Mills contenenti particelle a massa nulla erano rinormalizzabili. Era quindi sicuro che l'applicazione della rottura spontanea di simmetria avrebbe permesso anche la rinormalizzazione delle teorie Yang-Mills con particelle pesanti.

E infatti in poco tempo la scrisse.

A Veltman non piacque molto l'uso che aveva fatto 't Hooft del meccanismo di Higgs. In particolare lo preoccupava il fatto che la

presenza di un campo di Higgs di fondo, che pervada l'intero universo, dovrebbe manifestarsi attraverso effetti gravitazionali.⁵

E così i due continuarono a discutere. Alla fine 't Hooft decise di consegnare al suo relatore i risultati delle sue elaborazioni teoriche senza mostrargli esplicitamente da dove venivano. Veltman lo sapeva benissimo, ma si accontentò di controllare la veridicità dei risultati di 't Hooft.

Qualche anno prima, Veltman aveva sviluppato un nuovo metodo per affrontare calcoli algebrici complessi con un programma informatico che aveva battezzato *Schoonschip* («nave pulita» in olandese),⁶ uno dei primi sistemi di algebra computerizzata, in grado di maneggiare simbolicamente formule matematiche. Portò quindi con sé a Ginevra i risultati di 't Hooft, per verificarli sul calcolatore del CERN.

Veltman era su di giri, ma rimaneva scettico. Guardando i risultati mentre li inseriva nel programma, decise di eliminare qualche fattore 4 presente nelle formule di 't Hooft e dovuto in ultima analisi al bosone di Higgs. Pensava che non avessero senso, e li tolse.

Dopo non molto, al telefono con 't Hooft, dichiarava: «Funziona quasi. Hai solo sbagliato qualche fattore 2».⁷

Ma 't Hooft non aveva sbagliato. «Si rese conto a quel punto che era corretto anche il fattore 4» ricorda 't Hooft «e che tutto si compensava in maniera splendida. A quel punto era euforico quanto lo ero stato io».

Indipendentemente, e per pura coincidenza, 't Hooft aveva ricreato la teoria con simmetria rotta $SU(2) \times U(1)$ sviluppata da Weinberg nel 1967, e ne aveva dimostrato la rinormalizzabilità. Sulle prime aveva pensato di applicarla alle interazioni forti, ma quando Veltman chiese a un collega del CERN se conoscesse qualche altra applicazione della teoria $SU(2) \times U(1)$, gli fu indicato l'articolo di Weinberg. Veltman e 't Hooft si resero conto di avere sviluppato una teoria di campo delle interazioni elettrodeboli completamente rinormalizzabile.

Era una svolta decisiva. «L'effetto psicologico di una dimostrazione completa della rinormalizzabilità è stato immenso» scrisse Veltman qualche anno più tardi.⁸ In effetti ciò che aveva fatto 't Hooft era stato dimostrare che le teorie di Yang-Mills in generale sono rinormalizzabili. Anzi, le teorie di gauge locali sono l'unica categoria di teorie di campo che si possono rinormalizzare.

All'epoca, Gerard 't Hooft aveva solo 25 anni. Inizialmente Glashow non capì la dimostrazione, e disse di 't Hooft: «O questo tizio è un completo idiota, o è il più grande genio della fisica degli ultimi anni».⁹ Anche Weinberg non ci credeva, ma quando vide che un collega fisico teorico la prendeva sul serio, decise di guardare con più attenzione il lavoro di 't Hooft, e si convinse rapidamente.

A 't Hooft fu offerto un posto da professore associato a Utrecht.

A questo punto c'erano *tutti* gli ingredienti. Una teoria rinormalizzabile, con rottura spontanea di simmetria $SU(2) \times U(1)$, delle interazioni elettrodeboli era ormai a disposizione. Le masse dei bosoni W e Z emergevano «naturalmente» dall'applicazione del meccanismo di Higgs. Rimanevano alcune anomalie, ma 't Hooft aveva osservato in una nota del suo articolo che queste non compromettevano la rinormalizzabilità della teoria. «Naturalmente,» scrisse qualche anno dopo «l'interpretazione corretta dell'affermazione era che la rinormalizzabilità si poteva ristabilire aggiungendo una quantità opportuna di tipi di fermioni (quark), ma ammetto che io stesso avevo pensato che forse questo non era necessario».¹⁰

Le anomalie rimanenti si potevano eliminare aggiungendo nuovi quark al modello.

Che speranze c'erano a questo punto per una teoria di campo delle interazioni forti?

Gell-Mann ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1969 per i suoi molti contributi, in particolare la scoperta della stranezza e dell'Ottuplice Via. I suoi risultati furono elencati durante il discorso di presentazione tenuto da Ivar Waller, membro del Comitato per il Nobel. Waller nominò anche i quark e spiegò che, quantunque zelantemente cercati, non erano stati osservati; ciò nonostante – bontà sua – ne ammise il grande valore «euristico».

Gell-Mann si trovò ad affrontare l'improvvisa notorietà procurata dal premio Nobel. Fu inondato da richieste di partecipazione a convegni e di pubblicazione di articoli, e l'atto di scrivere, che aveva sempre trovato difficile, gli divenne impossibile. Lasciò addirittura passare la scadenza per l'invio della sua conferenza di accettazione del Nobel all'Accademia svedese per la pubblicazione su *Le Prix Nobel*.¹¹ Fu solo una delle tante scadenze non rispettate.

Nell'estate del 1970 si ritirò con la famiglia ad Aspen, in Colorado. Ma era un ritiro dagli impegni, non dalla fisica: una vacanza assieme alle famiglie di altri fisici presso l'Aspen Center for Physics.

Il centro sembrava fatto su misura per un premio Nobel in cerca di un po' di pace. Era stato creato nel 1962 dall'Aspen Institute for Humanistic Studies su suggerimento di due fisici. L'idea era creare una struttura che offrisse un ambiente tranquillo, rilassato e informale in cui i fisici potessero fuggire dalle quotidiane incombenze amministrative del loro lavoro accademico e semplicemente parlare di fisica tra loro. L'istituto mise a disposizione una parte del campus di Aspen Meadows, nel mezzo di un pioppeto¹² alla periferia della città.

Fu ad Aspen che Gell-Mann incontrò Harald Fritzsch, un fervente

adepto del modello a quark che rimase sbigottito nello scoprire il curioso atteggiamento ambivalente di Gell-Mann nei confronti della sua stessa creazione «matematica».

Fritzsch è nato a Zwickau, a sud di Lipsia, nella Germania Est, da dove scappò assieme a un collega sfuggendo alle autorità bulgare su un kayak munito di motore fuoribordo. I due navigarono per duecento miglia nel Mar Nero, diretti in Turchia.

Aveva iniziato a studiare per un dottorato in fisica teorica all'Istituto Max Planck di Monaco, dove uno dei suoi professori fu Heisenberg. Nell'estate del 1970 passò da Aspen mentre si recava in California.

Da studente, Fritzsch si era convinto che i quark dovessero essere il fondamento di una teoria di campo delle interazioni forti. Questi oggetti erano molto più che concetti matematici: esistevano davvero.

Gell-Mann fu colpito dall'entusiasmo del giovane tedesco e accettò che Fritzsch lo raggiungesse al Caltech circa una volta al mese. Insieme cominciarono a lavorare a una teoria di campo costruita a partire dai quark. Completati gli studi di dottorato all'inizio del 1971, Fritzsch si trasferì al Caltech.

Il giovane dottorando aveva scatenato un piccolo terremoto, scardinando l'atteggiamento conservatore di Gell-Mann verso i quark. Non fu solo un terremoto psicologico: l'arrivo di Fritzsch al Caltech il 9 febbraio 1971 coincise con un vero terremoto che colpì la valle di San Fernando quella stessa mattina, di grado 6,6 della scala Richter. «In ricordo di quell'evento,» scrisse in seguito Gell-Mann «non risistemai i quadri appesi alle pareti, che rimasero storti fino al successivo terremoto nel 1987».¹³

Gell-Mann fece in modo di ottenere le opportune sovvenzioni per sé e Fritzsch, e nell'autunno del 1971 i due si recarono al CERN. Fu qui che William Bardeen, figlio del John Bardeen della teoria della superconduttività, raccontò loro di certe anomalie nel calcolo della probabilità di decadimento dei pioni neutri. Bardeen ci aveva lavorato per un certo periodo con Stephen Adler a Princeton, e il risultato del loro calcolo era più basso di un fattore 3 rispetto al valore misurato. Adler ne aveva concluso che il modello a quark di carica intera di Han-Nambu forniva una predizione migliore.

Gell-Mann, Fritzsch e Bardeen unirono gli sforzi per esplorare le varie alternative, e capire se fosse possibile conciliare i risultati sperimentali sul decadimento del pione neutro con una variazione del modello originale a quark di carica frazionaria.

Come avevano suggerito Han e Nambu, quel che serviva era un nuovo numero quantico. Gell-Mann decise di chiamarlo «colore». Nel nuovo modello, per ogni quark sono possibili tre numeri quantici di colore: blu, rosso e verde.¹⁴

I barioni sono costituiti da tre quark di colore diverso, in modo che la «carica di colore» totale sia nulla (colore «bianco»). Per esempio, un protone si può immaginare formato da un quark u blu, un quark u rosso e un quark d verde ($u_b u_r d_v$); un neutrone da un quark u blu, un quark d rosso e un quark d verde ($u_b d_r d_v$). I mesoni, come i π e i K, sono costituiti da un quark di un colore e da un antiquark del corrispondente anti-colore, in modo che la carica di colore totale sia nulla e le particelle siano sempre «bianche».

Era una soluzione pulita. I quark di colore diverso fornivano quel grado di libertà ulteriore che scongiurava la violazione del principio di Pauli. Triplicare il numero di tipi di quark significava che la probabilità di decadimento del pione neutro risultava ora calcolata correttamente. E nessuno si poteva aspettare di vedere la carica di colore rivelata sperimentalmente, dato che questa è una proprietà dei quark e i quark sono «confinati» in adroni privi di colore. Il colore non si può vedere perché la natura richiede che tutte le particelle osservabili siano bianche.

«Poco alla volta ci rendemmo conto che la variabile “colore” avrebbe fatto tutto da sé!» racconta Gell-Mann. «Metteva a posto la statistica, e poteva farlo senza tirare in ballo altre nuove folli particelle. Poi ci rendemmo conto che sistemava anche la dinamica, perché ci si poteva costruire sopra una teoria di gauge SU(3), una teoria di Yang-Mills».¹⁵

A settembre del 1972 Gell-Mann e Fritzsche avevano elaborato un modello consistente di tre quark a carica frazionaria che possono assumere tre «gusti», o «sapori» (u, d, s), e tre colori, tenuti insieme da un sistema di otto gluoni colorati, mediatori della «forza di colore» forte. Gell-Mann presentò il modello a una conferenza di fisica delle alte energie tenuta in occasione dell'inaugurazione del National Accelerator Laboratory, a Chicago.

Ma stava già iniziando ad avere ripensamenti. Ancora una volta turbato dallo status dei quark e dal meccanismo che li rende permanentemente confinati, Gell-Mann cercò di smorzare gli entusiasmi riguardo alla teoria. Parlò di un possibile modello alternativo a un solo gluone, e insistette nel definire «fittizi» i quark e i gluoni.

Al momento di scrivere assieme a Fritzsche il contributo da pubblicare negli atti della conferenza, i dubbi avevano preso il sopravvento. «Nel preparare la versione scritta,» ricorda Gell-Mann «purtroppo fummo assaliti dai dubbi di cui abbiamo appena detto, e ci arenammo su questioni tecniche».¹⁶

Questa mancanza di coraggio non è così difficile da capire. Se i quark colorati fossero stati davvero confinati permanentemente all'interno di barioni e mesoni «bianchi», rendendo impossibili da

osservare le loro cariche elettriche frazionarie e le loro cariche di colore, si sarebbe potuto obiettare che qualunque speculazione sulle loro proprietà era intrinsecamente oziosa.

I fisici teorici erano ora molto vicini a una sintesi globale: una combinazione di teorie di campo basate su una simmetria $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$; una sintesi che, chiamata in seguito Modello Standard, avrebbe rappresentato la cornice teorica della fisica sperimentale delle particelle per i successivi trent'anni. Questa esitazione non era che un respiro profondo prima del tuffo.

In effetti, allettanti indizi dell'esistenza dei quark erano emersi qualche anno prima dalle collisioni ad alta energia di elettroni e protoni. I risultati degli esperimenti condotti in California allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) suggerivano con forza l'ipotesi che il protone fosse composto di costituenti puntiformi.

Ma non era chiaro se questi costituenti fossero quark. Ancor più misteriosamente i risultati indicavano che, lungi dall'essere stretti in una poderosa morsa dentro al protone, questi costituenti si comportavano come se fossero completamente liberi di muoversi all'interno dei loro ospiti. Come poteva ciò conciliarsi con l'idea del confinamento dei quark?

Il lavoro dei teorici era quasi finito. Il Modello Standard era quasi pronto. Ora toccava agli sperimentali.

PARTE SECONDA
LA SCOPERTA

Nel quale si dimostra che i protoni e i neutroni hanno una struttura interna e le previste correnti neutre delle interazioni nucleari deboli vengono prima trovate, poi perse e infine ritrovate.

I raggi cosmici possono produrre collisioni di particelle a energie tra le più alte mai osservate, talvolta molto più alte di quella che si può raggiungere con gli acceleratori di particelle odierni.¹ Ma l'origine dei raggi cosmici è misteriosa, non si conoscono le particelle e le energie coinvolte nei processi che li scatenano. Gli esperimenti sui raggi cosmici fanno affidamento sull'osservazione casuale di nuove particelle o nuovi processi, che può risultare difficilmente riproducibile.

Nonostante i successi degli esperimenti sui raggi cosmici con le scoperte del positrone, del muone e dei mesoni π e K nei due decenni tra il 1930 e il 1950, gli ulteriori progressi della fisica delle particelle dovettero attendere la realizzazione di acceleratori sempre più potenti.

I primi acceleratori furono costruiti alla fine degli anni Venti: erano acceleratori lineari, che fornivano energia agli elettroni facendoli passare attraverso una sequenza di campi elettrici oscillanti disposti in traiettoria rettilinea. Un acceleratore di questo tipo fu usato nel 1932 da John Cockcroft e da Ernest Walton per produrre protoni di alta velocità che poi venivano sparati contro bersagli fissi, trasformandone i nuclei attraverso le prime reazioni nucleari indotte artificialmente.²

Nel 1929 il fisico americano Ernest Lawrence inventò un modello diverso di acceleratore, che usava un magnete per forzare un fascio di protoni a muoversi in una traiettoria a spirale mentre venivano accelerati a velocità sempre più alte da campi elettrici alternati. Lo chiamò *ciclotrone*.

Lawrence era anche un tipo alquanto istrionico, con mire piuttosto grandiose. Proseguì con una serie di macchine sempre più grandi, culminata nel 1939 con il progetto di un colossale super-ciclotrone con un magnete di 2000 tonnellate. Secondo la stima di Lawrence, la macchina avrebbe dovuto fornire ai protoni un'energia di 100 milioni di elettronvolt (100 MeV), vicina alla soglia necessaria alla

penetrazione dei protoni nel nucleo. Lawrence si rivolse alla Fondazione Rockefeller per avere sostegno finanziario. La sua richiesta fu notevolmente rafforzata dalla notizia, giuntagli nel bel mezzo di una partita di tennis, dell'assegnazione del premio Nobel 1939 per la Fisica.

Con lo scoppio della guerra, la tecnologia di Lawrence fu reindirizzata al problema di ottenere i quantitativi di uranio 235 sufficienti alla costruzione della bomba atomica che sarebbe poi stata sganciata su Hiroshima. L'apparato Y-12 per la separazione elettromagnetica degli isotopi costruito a Oak Ridge, nel Tennessee, si basava sul ciclotrone di Lawrence.³

I magneti utilizzati a Y-12 erano lunghi 76 metri e pesavano fra le 3000 e le 10 000 tonnellate. La loro costruzione esaurì le riserve di rame degli Stati Uniti, e il Tesoro americano dovette prestare al Progetto Manhattan 15 000 tonnellate d'argento per completare le bobine. I magneti consumavano una potenza pari a quella di una grande città, ed erano così forti che gli operai percepivano l'attrazione magnetica sugli scarponi chiodati. Talvolta, passando presso i magneti le donne perdevano le forcine; e le tubature si staccavano dai muri. L'impianto, che iniziò a funzionare nel novembre del 1943, impiegava tredicimila persone.

Fu il primo esempio di quella che oggi viene chiamata *big science*, ovvero «scienza in grande».

Il ciclotrone usava un campo magnetico di intensità costante e un campo elettrico a frequenza fissata, e dunque comportava un limite intrinseco alle energie delle particelle, di circa 1000 MeV (o 1 GeV). Per ottenere energie più elevate, è necessario raggruppare le particelle da accelerare in «pacchetti» a cui far percorrere una traiettoria circolare, lungo la quale il campo elettrico e quello magnetico vengono variati in modo sincrono. Tra i primi esempi del cosiddetto *sincrotrone* vi furono il Bevatron, un acceleratore da 6,3 GeV costruito nel 1950 al Radiation Laboratory di Berkeley in California, e il Cosmotron, una macchina da 3,3 GeV costruita nel 1953 al Brookhaven National Laboratory di New York.

Altri paesi cominciarono a entrare in gioco. Il 29 settembre 1954, dodici paesi dell'Europa occidentale ratificarono un accordo che istituiva il Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare o CERN.⁴ Tre anni più tardi l'Istituto sovietico per la ricerca nucleare inaugurò un sincrotrone a protoni da 10 GeV a Dubna, 120 chilometri a nord di Mosca. Il CERN lo seguì poco tempo dopo, nel 1959, con un sincrotrone a protoni, o protosincrotrone, da 26 GeV.

I finanziamenti per la fisica delle alte energie negli Stati Uniti crebbero significativamente negli anni Sessanta, quando la corsa alla supremazia tecnologica all'interno della Guerra Fredda arrivò al calor

bianco. Nel 1960 fu costruito al Brookhaven il Sincrotrone a gradiente alternato (AGS), in grado di operare a 33 GeV. Sembrava evidente che lo sviluppo futuro della fisica delle particelle fosse nelle mani dei progettisti di sincrotroni e della loro capacità di spingere la tecnologia a energie di collisione sempre più elevate.

Perciò, quando alla Stanford University in California ebbe inizio la costruzione di un nuovo acceleratore *lineare* di elettroni, lo SLAC, da 20 GeV, al costo di 114 milioni di dollari, molti fisici delle particelle lo liquidarono come macchina irrilevante, utile solo per esperimenti di secondo piano.

Ma altri riconobbero che l'enfasi sulle collisioni adroniche a energie sempre più alte andava a discapito della finezza. I sincrotroni erano usati per accelerare protoni e farli schiantare contro bersagli fissi che contenevano altri protoni. Come disse Richard Feynman, far collidere fra loro due protoni era «come spiacciare due orologi uno contro l'altro per vedere come sono fatti». ⁵

Lo SLAC fu costruito su un appezzamento di circa 16 ettari appartenente alla Stanford University, circa 60 chilometri a sud di San Francisco. Il fascio di elettroni raggiunse l'energia di progetto di 20 GeV per la prima volta nel 1967. L'acceleratore, lungo 3 chilometri, è lineare anziché circolare perché curvare un fascio di elettroni per mezzo di campi magnetici di alta intensità comporta una notevole perdita di energia per emissione di raggi X (radiazione di sincrotrone).

Quando un elettrone collide con un protone si possono verificare tre tipi di interazione. L'elettrone può rimbalzare sul protone in maniera relativamente innocua, scambiando un fotone virtuale e cambiando velocità e direzione di volo, ma lasciando intatte le due particelle. Questa cosiddetta «diffusione elastica» dà luogo a elettroni di energia relativamente alta, i cui valori risultano concentrati attorno a un picco.

In un secondo tipo di interazione il fotone virtuale scambiato nell'interazione può mandare il protone in uno di vari possibili stati energetici eccitati. L'elettrone deviato di conseguenza vola via con energia inferiore, e il grafico del numero di diffusioni osservate in funzione del valore dell'energia dell'elettrone diffuso mostra una serie di picchi, o «risonanze» corrispondenti ai diversi stati eccitati del protone. Una diffusione di questo tipo è «anelastica» perché si possono creare nuove particelle (per esempio pioni), anche se tanto l'elettrone quanto il protone emergono intatti dall'interazione. In sostanza, parte dell'energia della collisione, e del fotone virtuale scambiato, va nella creazione di nuove particelle.

Il terzo tipo di diffusione, chiamata «profondamente anelastica», è quello in cui, a spese di molta dell'energia dell'elettrone e del fotone virtuale scambiato, il protone viene completamente distrutto. Come

risultato si ha uno spruzzo di adroni diversi e l'elettrone questa volta rimbalza con energia considerevolmente più bassa.

Gli studi sulla diffusione profondamente anelastica ad angoli relativamente piccoli di un fascio di elettroni su un bersaglio di idrogeno liquido cominciarono allo SLAC nel settembre del 1967, condotti da un piccolo gruppo sperimentale che comprendeva Jerome Friedman e Henry Kendall del MIT, e Richard Taylor dello SLAC.

L'attenzione del gruppo si concentrò sul comportamento della cosiddetta «funzione di struttura» al variare della differenza tra l'energia iniziale dell'elettrone e quella dopo la collisione, ossia dell'energia del fotone virtuale scambiato. I fisici videro che al crescere dell'energia trasferita la funzione di struttura presentava picchi marcati in corrispondenza delle risonanze attese. Tuttavia, a valori ancora più alti dell'energia, i picchi lasciavano il posto a una larga regione pianeggiante, che degradava lentamente via via che si estendeva nella regione delle collisioni profondamente anelastiche.

Curiosamente, la forma della funzione mostrava una scarsissima dipendenza dall'energia iniziale dell'elettrone. Gli sperimentali non capivano perché. Ma il teorico James Bjorken sì.

Bjorken aveva conseguito il dottorato alla Stanford University nel 1959 e aveva fatto da poco ritorno in California dopo un periodo trascorso all'Istituto Niels Bohr di Copenaghen. Poco prima del completamento dello SLAC, Bjorken aveva trovato un modo per predire i risultati delle collisioni elettrone-protone, usando un approccio piuttosto esoterico fondato sulla teoria dei campi.

In questo modello il protone poteva esser visto in due modi distinti: come una «palla» compatta di materia, con massa e carica uniformemente distribuite, oppure come una regione di spazio in gran parte vuota ma contenente costituenti puntiformi e carichi, proprio come era accaduto per l'atomo quando, nel 1911, si dimostrò che era fatto di spazio vuoto contenente un minuscolo nucleo di carica positiva.

Questi due modi molto diversi di pensare alla struttura del protone avrebbero prodotto risultati molto diversi nella diffusione. Bjorken aveva capito che elettroni di energia sufficientemente alta possono penetrare all'interno di un protone «composito» e collidere con i suoi costituenti puntiformi. Nella regione delle collisioni profondamente anelastiche questo implica un aumento del numero relativo di elettroni diffusi e dei valori dell'angolo di diffusione, il che dà alla funzione di struttura la forma osservata sperimentalmente.

Bjorken non aveva osato affermare che quei costituenti puntiformi potessero essere quark. Il modello a quark era ancora irriso dalla comunità fisica, e c'erano teorie alternative che godevano di maggiore stima. Tra gli stessi fisici del gruppo MIT-SLAC si accendevano discussioni

sull'interpretazione dei dati. Di conseguenza, nessuno si affrettò a dichiarare che i risultati erano una prova dell'esistenza dei quark.

Così, le cose rimasero ferme per un'altra decina di mesi.

Nell'agosto del 1968 Richard Feynman fece visita allo SLAC. Dopo aver lavorato sulla forza nucleare debole e su argomenti di gravità quantistica, aveva deciso di rivolgere di nuovo la propria attenzione alla fisica delle alte energie. Sua sorella Joan abitava in una casa non molto distante dallo SLAC e, quando andava a trovarla, Richard approfittava dell'occasione per «ficcare il naso» allo SLAC e scoprire che cosa stava succedendo in quel settore.

Feynman aveva sentito parlare del lavoro del gruppo MIT-SLAC sulla diffusione profondamente anelastica. Stava per iniziare un secondo turno di esperimenti, ma i fisici si arrovellavano ancora sull'interpretazione dei dati dell'anno precedente.

Bjorken era fuori città, ma il suo nuovo assistente *post-doc* Emmanuel Paschos parlò a Feynman del comportamento della funzione di struttura e gli chiese che cosa ne pensasse. Quando vide i dati Feynman esclamò: «È tutta la vita che cerco un esperimento come questo, in grado di verificare una teoria di campo della forza forte!».⁶ Trovò una spiegazione quella stessa notte.

Feynman si convinse che il comportamento osservato dai fisici del gruppo MIT-SLAC era legato alla distribuzione in quantità di moto dei costituenti puntiformi all'interno del protone, che battezzò «partoni» (ossia «parti di protoni») per evitare di collegarli a qualunque modello specifico della struttura del protone.⁷

«Ragazzi, ho qualcosa da farvi vedere» dichiarò Feynman a Friedman e Kendall il mattino dopo. «Ho capito tutto stanotte, nella mia stanza in albergo!».⁸ Bjorken era già arrivato alla maggior parte delle conclusioni ora tratte da Feynman, il quale gliene diede credito. Ma, ancora una volta, Feynman descriveva la fisica in un modo molto più semplice eppure più ricco, più visivo. Quando tornò allo SLAC nell'ottobre del 1968 e tenne una lezione sul modello a partoni, fu come appiccare un incendio. Nulla avalla un'idea audace quanto il supporto entusiasta di un premio Nobel.

I partoni erano davvero quark? Feynman non lo sapeva, e non gli interessava; Bjorken e Paschos invece ben presto svilupparono un modello dettagliato dei partoni basato su una tripletta di quark.

Nuovi studi della diffusione profondamente anelastica di elettroni su neutroni allo SLAC e di neutrini su protoni al CERN fornirono nuove prove a sostegno del modello. A metà del 1973 i quark erano ormai ufficialmente «arrivati». Concepiuti in parte per scherzo come uno strano ghiribizzo della natura, avevano compiuto un passo decisivo verso l'accettazione come reali costituenti degli adroni.

Rimanevano senza risposta alcuni interrogativi importanti. Il

comportamento della funzione di struttura si poteva spiegare per bene solo ipotizzando che i quark potessero muoversi all'interno del protone o del neutrone in modo completamente indipendente l'uno dall'altro. Eppure gli elettroni da 20 GeV avevano colpito i singoli quark e distrutto il nucleone bersaglio; allora come mai non era stato emesso nessun quark libero?

La cosa non aveva senso. Se la forza forte teneva i quark così strettamente legati nei nucleoni da «confinarli» per sempre e renderli impossibili da osservare, com'era possibile che all'interno del nucleone essi circolassero in apparenza liberi?

A partire dalla fine del 1971 era disponibile una teoria completa delle interazioni deboli, e la fiducia dei fisici teorici cominciava a crescere. La rottura di simmetria mediante il meccanismo di Higgs poteva spiegare la distinzione tra elettromagnetismo e forza nucleare debole, che altrimenti sarebbero la stessa cosa, e cioè una forza universale elettrodebole. La rottura di simmetria aveva lasciato il fotone privo di massa, dando massa ai mediatori della forza debole. La forza debole richiedeva due mediatori carichi, il W^+ e il W^- , e uno neutro, la Z_0 . Se la Z_0 esisteva, le interazioni che ne comportano lo scambio si sarebbero manifestate, ci si aspettava, sotto forma di correnti neutre.

Se la teoria era corretta, ci si aspettava altresì che i mesoni K neutri fossero soggetti a correnti neutre che comportavano anche un cambiamento di stranezza. L'assenza, piuttosto imbarazzante, di tali correnti era ora spiegata ricorrendo al meccanismo GIM e all'esistenza di un quarto quark, il *charm*.

I teorici rivolsero l'attenzione ad altre sorgenti di correnti neutre che non comportassero variazioni del numero di stranezza, e cominciarono a far pressione sugli sperimentali affinché le cercassero. I migliori eventi candidati erano le interazioni tra neutrini muonici e nucleoni, ossia protoni e neutroni. Nella collisione di un neutrino muonico con un neutrone, per esempio, lo scambio di un W^- virtuale trasforma il neutrino in un muone negativo e il neutrone in un protone: questa è una corrente carica. Lo scambio di una Z_0 lascia intatti sia il neutrino sia il neutrone: è una corrente neutra (fig. 15). Se avvengono entrambi i processi, la prova delle correnti neutre si può ottenere sparando neutrini muonici su nucleoni e cercando eventi in cui non si produce alcun muone. Weinberg stimò che per 100 eventi di corrente carica ce ne dovessero essere tra i 14 e i 33 di corrente neutra.

Il problema era che i neutrini sono particelle estremamente leggere e neutre, che non lasciano traccia nei rivelatori di particelle. Questi

infatti funzionano grazie al passaggio di particelle *cariche*, le quali scalzano gli elettroni dagli atomi del materiale attraversato e lasciano dietro a sé una scia di ioni carichi. Il primo rivelatore di questo tipo fu inventato dal fisico scozzese Charles Wilson nel 1911: nella sua «camera a nebbia» le tracce delle particelle sono rese visibili dalla condensazione del vapore acqueo attorno agli ioni presenti nella scia.

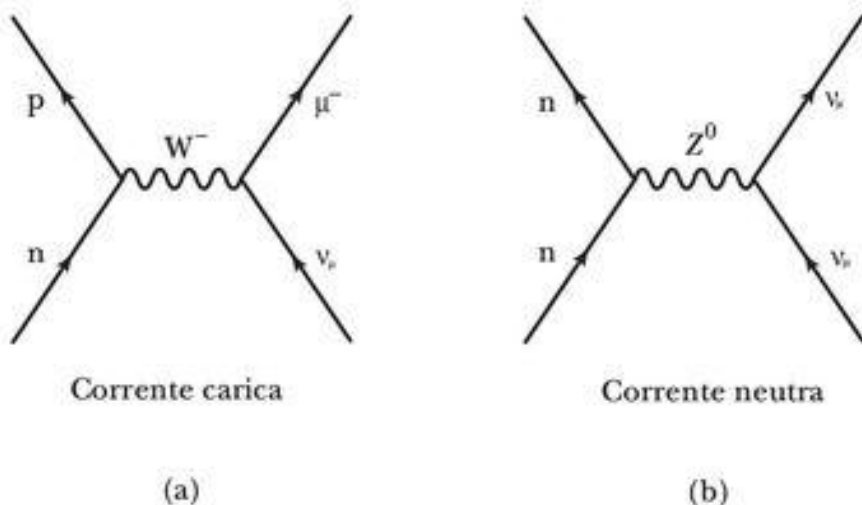


Figura 15 a) Un neutrone collide con un neutrino muonico scambiando un W^- virtuale, il quale trasforma il neutrone in protone e il neutrino in muone. È una «corrente carica». b) La stessa collisione può anche dar luogo allo scambio di una Z^0 virtuale. Nessuna delle particelle cambia identità e non si crea nessun muone. Questo evento «senza muoni» è un evento di corrente neutra.

La camera a nebbia fu sostituita all'inizio degli anni Cinquanta dalla «camera a bolle», inventata dal fisico americano Donald Glaser, ma il principio di funzionamento rimaneva molto simile. Una camera a bolle viene riempita di un liquido mantenuto vicino al punto di ebollizione. Anche in questo caso una particella carica che attraversa il liquido lascia una scia di elettroni e ioni. Se la pressione cui è sottoposto il liquido diminuisce il liquido inizia a bollire. Ma comincerà a farlo a partire dalla scia di ioni lasciati dalla particella, formando una sequenza di bollicine che renderanno visibile la traccia. Le tracce si possono fotografare, dopodiché si può aumentare di nuovo la pressione per fermare l'ebollizione.

Il vantaggio della camera a bolle è che il liquido di cui è riempita può anche fungere da bersaglio per le particelle provenienti da un acceleratore. Nella maggior parte delle camere a bolle veniva usato idrogeno liquido, ma si potevano adoperare anche liquidi più pesanti, come il propano e i freon (i refrigeranti usati nei vecchi frigoriferi).

La marcatura distintiva di un evento «senza muoni» del tipo cercato

da Weinberg avrebbe avuto la forma di uno spruzzo di adroni che nel rivelatore sembrano sgorgare dal nulla. Ma c'erano molte altre spiegazioni, abbastanza terra-terra, di questi misteriosi spruzzi adronici. I neutrini muonici potevano aver colpito atomi delle pareti del rivelatore, estraendone neutroni che avrebbero potuto poi generare casualmente altri adroni nella camera a bolle. Anche eventi verificatisi «a monte» del rivelatore potevano produrre neutroni vaganti che avrebbero a loro volta generato adroni. E se un muone prodotto con corrente carica fosse stato deviato a grande angolo, c'era una buona probabilità che non lo si rivelasse affatto. Eventi «di fondo» come questi potevano facilmente essere scambiati per autentici eventi senza muoni, e dunque erroneamente identificati come correnti deboli neutre.

Gli sperimentali erano estremamente cauti di fronte alle difficoltà che comportavano ricerche di questo genere. Un elenco di priorità stilato dai fisici del CERN nel novembre del 1968 metteva al primo posto le particelle W, lasciando solo all'ottavo la ricerca delle correnti neutre. «Il fatto è che fino al 1973 non c'erano prove solide in favore delle correnti neutre, mentre erano moltissime quelle contro» scrive il fisico di Oxford Donald Perkins.⁹

Già nella primavera del 1972, tuttavia, gli enormi progressi compiuti dai teorici avevano spinto le correnti neutre tra le priorità in agenda. I fisici cominciarono a pensare che fosse possibile trovare una risposta definitiva.

Una nutrita e crescente collaborazione internazionale, guidata dal fisico del CERN Paul Musset, da André Lagarrigue del laboratorio di Orsay e da Donald Perkins, analizzava i dati di Gargamelle, la più grande camera a bolle del mondo. Finanziata dalla commissione francese per l'energia atomica, Gargamelle era stata costruita in Francia e installata al CERN nel 1970 accanto al protosincrotrone da 26 GeV.¹⁰ La sua costruzione era durata sei anni, ed era stata progettata appositamente per lo studio di collisioni che implicavano neutrini.

Gargamelle era operativa da quasi un anno, e aveva sfornato un sacco di eventi senza muoni che erano stati liquidati come «rumore di fondo» prodotto da neutroni vaganti. Gli sperimentali iniziarono ora a considerare questi eventi con rinnovato interesse.

La difficoltà stava nel distinguere gli autentici eventi senza muoni dovuti a correnti neutre da quelli prodotti da neutroni di fondo, da diffusione di muoni a grande angolo e da errori di identificazione di particelle. Era un lavoro minuzioso e poco gratificante, ma verso la fine del 1972 molti scienziati della collaborazione Gargamelle – che ormai comprendeva fisici di sette laboratori europei, nonché ospiti americani, giapponesi e russi – cominciarono a convincersi di aver trovato qualcosa. Le opinioni all'interno della collaborazione erano

però discordanti, non tanto sulla realtà delle correnti neutre in sé, quanto sul fatto che le prove raccolte fossero o meno abbastanza convincenti.

Negli Stati Uniti, intanto, era iniziata una seconda ricerca. Al National Accelerator Laboratory (NAL)¹¹ di Chicago era stato costruito il protosincrotrone più grande del mondo, che nel marzo 1972 raggiunse l'energia di progetto di 200 GeV. Carlo Rubbia a Harvard, Alfred Mann all'Università della Pennsylvania e David Cline in quella del Wisconsin usavano ora i neutrini muonici generati dal sincrotrone per cercare eventi senza muoni. L'équipe del CERN aveva iniziato prima, ma le relazioni preliminari non riportavano nessuna conclusione certa. Rubbia era ambizioso e determinato ad arrivare per primo.

Trovare eventi senza muoni era facile. Il difficile era dimostrare che erano causati da correnti neutre. Quando Musset presentò nuovi dati preliminari all'inizio del 1973 non ci fu alcun clamore, nessun annuncio della scoperta che tutti stavano inseguendo.

Il vantaggio tecnologico del gruppo del NAL offriva un'opportunità di recuperare lo svantaggio temporale. Il loro sincrotrone era più potente e in grado di produrre più eventi di diffusione di muoni in meno tempo. La massa bersaglio del loro rivelatore era inoltre maggiore di quella di Gargamelle, il che aumentava la probabilità di rivelare eventi di diffusione. Questi fattori aiutavano a ridurre l'impatto dei neutroni di fondo, ma nulla si poteva fare contro i muoni diffusi a grande angolo che «sfuggivano» alla rivelazione. Rubbia e il suo gruppo di Harvard cercarono di tenerne conto stimandone teoricamente il contributo con una simulazione al computer, e sottraendolo poi dal numero di eventi senza muoni misurato sperimentalmente, così da ottenere il numero di eventi autentici.

Era un compromesso un po' goffo, che insospettiva parecchio Mann e Cline. Rubbia, sapendo che i fisici del CERN stavano accumulando prove, aveva fretta.¹² Mann e Cline sapevano fin troppo bene come pressioni di questo genere potessero facilmente indurre i fisici ad autosuggestionarsi e convincersi dell'esistenza di qualcosa che in realtà non c'è. Invocarono quindi la prudenza.

Le notizie sui progressi dei fisici del NAL raggiunsero il CERN nel luglio 1973. Rubbia scrisse a Lagarrigue sostenendo di aver accumulato «circa cento eventi [di corrente neutra] non ambigui» e suggerendo che i due gruppi pubblicassero i propri risultati simultaneamente.¹³ Lagarrigue declinò garbatamente. I fisici del CERN avevano identificato autentici eventi senza muoni nelle collisioni di neutrini muonici con nucleoni e avevano stimato a 0,21 il rapporto tra eventi di corrente neutra ed eventi di corrente carica. Per le collisioni di antineutrini muonici il rapporto era 0,45. I fisici dichiararono quindi che le correnti neutre erano state finalmente trovate e inviarono un articolo

a «Physics Letters», che fu pubblicato a settembre.

Il gruppo NAL aveva misurato lo stesso rapporto ma combinato per neutrini e antineutrini muonici, trovando un valore di 0,29, in buon accordo con i risultati del CERN.¹⁴

Proprio in quei giorni critici scade il visto di Rubbia, il quale, nonostante la cattedra a Harvard, fu minacciato di espulsione. Durante l'udienza di appello negli uffici dell'Immigration and Naturalization Service a Boston perse la pazienza e, nel giro di ventiquattr'ore, era su un volo che lo portava fuori dal paese.

Con Rubbia fuori dal gioco, i fisici del NAL cominciarono a perdere colpi. Il loro articolo, che era stato inviato alla «Physical Review Letters» in agosto, era stato rifiutato dai revisori paritari sulla scorta del fatto che il problema dell'eliminazione di falsi eventi senza muoni non era stato affrontato correttamente. Cline e Mann decisero di ricostruire il rivelatore, con l'intenzione di risolvere la faccenda, in un modo o nell'altro.

Gli eventi autenticamente senza muoni improvvisamente sparirono, e il rapporto tra le correnti neutre e le cariche scese fino a 0,05. I fisici del NAL si convinsero di essere stati fuorviati dai loro risultati precedenti.

Rubbia era una figura di primo piano anche al CERN, e decise di farsi sentire. Avvisò il direttore generale del CERN Willibald Jentschke che la collaborazione Gargamelle aveva commesso un grosso errore. Il CERN era ancora molto in ombra rispetto ai più prestigiosi rivali americani e la sua reputazione aveva subito contraccolpi a causa di qualche sbaglio fatto in precedenza. Molti fisici europei erano inclini a pensare che il risultato di Gargamelle fosse sbagliato, tanto che uno dei veterani del CERN ci scommise la metà del contenuto della sua cantina. Sgomento all'idea che la reputazione del CERN stesse per subire un altro colpo, Jentschke convocò i membri di Gargamelle per una riunione, che si trasformò in una sorta di processo inquisitorio.

Ma, per quanto scossi dagli sviluppi, i fisici di Gargamelle decisero di sostenere fino in fondo le loro conclusioni. Avendo incontrato Jentschke in un ascensore del CERN, Perkins lo rassicurò: «Sapevo che il gruppo aveva ripetuto l'analisi degli eventi molte volte e che per quasi un anno aveva cercato intensamente qualche altra spiegazione dell'effetto osservato, senza trovarne» racconta Perkins. «Ritenevo perciò che il risultato fosse assolutamente solido, e che Jentschke non dovesse considerare le voci da oltre Atlantico. Non so se le mie parole lo rassicurarono, ma uscì dall'ascensore con un sorriso sul volto». ¹⁵

Rubbia fece ritorno al NAL all'inizio di novembre e il gruppo così riunito cominciò la stesura di un articolo piuttosto diverso, in cui si dichiarava che le correnti neutre non erano state trovate, in contrasto con il recente risultato riportato dal CERN e con le previsioni della teoria

elettrodebole.

Seguì un voltafaccia piuttosto imbarazzante. Verso la metà di dicembre i fisici del NAL si erano accorti di aver erroneamente identificato come muoni dei pioni prodotti in altre collisioni di neutrini. Questo effetto aveva praticamente azzerato il conteggio degli eventi senza muoni. Le correnti neutre erano tornate. Cline dovette ammettere «la netta possibilità che un segnale privo di muoni dell'ordine del 10 per cento stia emergendo nei dati».¹⁶ Non riuscì a trovare il modo di fare sparire questi eventi. Il gruppo del NAL decise di inviare di nuovo l'articolo originale, con le opportune modifiche; il lavoro fu pubblicato sulla «Physical Review Letters» nell'aprile del 1974.

Nella comunità fisica qualcuno parlò, scherzando, della «scoperta delle correnti neutre alternate».

A metà del 1974 il risultato era ormai stato confermato da altri laboratori, e la confusione definitivamente dissipata. Le correnti deboli neutre erano un fatto sperimentalmente accertato.

Ma le implicazioni della scoperta avevano una portata ancora maggiore. Le correnti neutre implicavano l'esistenza di «fotoni pesanti» mediatori della forza debole. E se nei decadimenti delle particelle strane non si osservavano correnti neutre, era perché il meccanismo GIM le sopprimeva.

In altre parole, doveva esistere anche un quarto quark.

Nel quale viene formulata la cromodinamica quantistica, viene scoperto il quark charm e si trovano le particelle W e Z, esattamente dove era previsto che fossero.

Le tessere del mosaico stavano ricomponendosi. L'enigma dell'esistenza di particelle puntiformi libere di muoversi all'interno dei nucleoni, rivelate dagli esperimenti sulla diffusione profondamente anelastica allo SLAC, aveva trovato una spiegazione: si trattava, come fu dimostrato, di una conseguenza diretta della natura della forza nucleare forte, la quale si comporta in maniera ben poco intuitiva.

Quando immaginiamo un'interazione come una forza tra due particelle, tendiamo a pensare a esempi quali la gravità o l'elettromagnetismo, in cui la forza aumenta di intensità al diminuire della distanza tra le particelle.¹ Ma la forza nucleare forte non si comporta così, ed è invece caratterizzata dalla cosiddetta *libertà asintotica*: nel limite asintotico di separazione nulla tra due quark, le due particelle non sentono alcuna forza e sono completamente «libere». Se la distanza tra quark cresce superando i confini del nucleone, invece, la forza forte stringe la morsa e li tiene sotto scacco.

È come se i quark fossero fissati agli estremi di un elastico molto forte. Quando i quark sono vicini all'interno di un nucleone, l'elastico è lasco e praticamente non esercita alcuna forza. Avvertiamo una forza solo quando cerchiamo di separare i quark, e così facendo tendiamo l'elastico (fig. 16).

Verso la fine del 1972 il fisico teorico di Princeton David Gross si era riproposto di dimostrare che la libertà asintotica in una teoria di campo quantistica era semplicemente impossibile. Con l'aiuto del suo studente Frank Wilczek riuscì invece a dimostrare l'esatto contrario. Le teorie di campo basate su simmetrie di gauge locali *permettono* la libertà asintotica. La stessa scoperta fu fatta indipendentemente da David Politzer, giovane dottorando di Harvard. I due articoli furono pubblicati fianco a fianco nel numero di giugno 1973 di «Physical Review Letters».²

Nel giugno di quell'anno Gell-Mann si ritirò ancora una volta

all'Aspen Center, portando con sé i *preprints* degli articoli di Gross-Wilczek e Politzer. Lo raggiunsero Fritzsch e Heinrich Leutwyler, un teorico dell'Università di Berna che stava trascorrendo un periodo di studio al Caltech. Insieme i tre elaborarono una teoria di Yang-Mills che descriveva tre quark colorati e otto gluoni colorati privi di massa.³ Per spiegare la libertà asintotica, era ora *necessario* che i gluoni avessero carica di colore. Non serviva alcun trucco che implicasse un meccanismo simile a quello di Higgs.

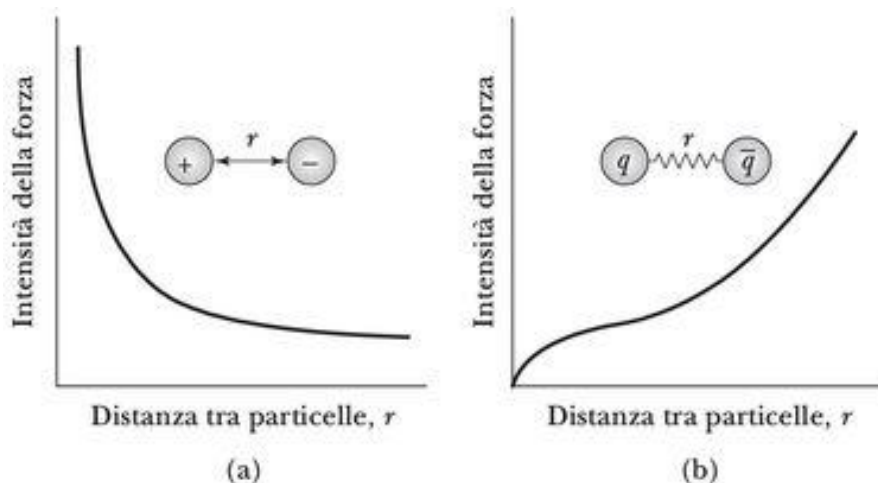


Figura 16 a) La forza elettromagnetica di attrazione tra due particelle cariche cresce al diminuire della distanza. b) La forza di colore che lega i quark all'interno degli adroni, invece, si comporta in modo piuttosto diverso. Nel limite di separazione nulla tra un quark e un antiquark (per esempio), la forza va a zero, mentre aumenta all'aumentare della distanza.

Alla nuova teoria serviva un nome. Nel 1973 Gell-Mann e Fritzsch l'avevano chiamata «dinamica adronica quantistica», ma l'anno successivo Gell-Mann pensò di aver trovato un nome migliore. «La teoria aveva molte virtù e nessun vizio noto» racconta. «Fu in seguito, nel corso di un'estate ad Aspen, che inventai il nome “cromodinamica quantistica”, o QCD, e lo proposi a Heinz Pagels e ad altri».⁴

Sembrava finalmente a portata di mano una grande sintesi che combinasse le interazioni forti ed elettrodeboli in un'unica struttura $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Ma mentre la libertà asintotica poteva spiegare perché i quark interagiscono solo molto debolmente all'interno degli adroni, non spiega perché i quark sono confinati. Vari modelli, più o meno pittoreschi, sono stati ideati al riguardo. In uno di questi si immagina che il campo gluonico che circonda i quark formi tubicini o corde («stringhe») di carica di colore tra coppie di quark. Quando due quark vengono allontanati la corda prima si tende e poi si allunga,

aumentando la resistenza a ulteriori allungamenti via via che la distanza cresce.

A furia di tirarla la corda si spezza, ma lo fa a energie sufficienti per creare coppie quark-antiquark dal vuoto. Dunque, per esempio, non è possibile estrarre un quark da un nucleone senza creare un antiquark che gli si affianca immediatamente formando un mesone, e un altro quark che lo sostituirà all'interno del nucleone. Il risultato finale è che l'energia viene incanalata nella creazione di un mesone, e non si osserva nessun quark isolato. Più che essere confinati, i quark non si vedono mai in giro senza *chaperon*.⁵

Il costo, in termini energetici, di una carica di colore «nuda» o isolata è molto grande. In linea di principio, l'energia di un singolo quark isolato è infinita. Rapidamente, il quark si ricopre di gluoni virtuali nel tentativo di mascherare la carica di colore, e l'energia aumenta ancora. Costa molto meno energia mascherare la carica accoppiandosi o con un antiquark dello stesso colore o con altri due quark di colore diverso, così da annullare la carica di colore totale e rendere «bianca» la particella risultante.

Tuttavia la carica del quark non si può mascherare del tutto: per farlo bisognerebbe mettere in un certo senso i quark precisamente uno sull'altro. Ma i quark sono come gli elettroni – sono particelle quantistiche con proprietà ondulatorie oltre che particellari. Per il principio di Heisenberg, definire in modo così preciso la posizione dei quark porterebbe a un'indeterminazione infinita della loro quantità di moto. Questo implicherebbe la possibilità di valori infiniti della quantità di moto, il che è altrettanto costoso in termini energetici.

La natura sceglie un compromesso. La carica di colore non si può mascherare completamente e in compenso l'energia, che si manifesta nei campi gluonici associati, può essere contenuta entro limiti tollerabili. Rimane pur tuttavia non trascurabile. Risulta infatti che le masse (ipotetiche) dei quark *u* e *d* sono piuttosto piccole, comprese rispettivamente tra 1,5 e 3,3 MeV, e tra 3,5 e 6,0 MeV.⁶ La massa del protone è misurata a 938 MeV, quella del neutrone a 940 MeV. La somma delle masse di due quark *u* e un quark *d* ammonterebbe a qualcosa come 6,5-12,6 MeV. Allora da dove viene il resto della massa del protone? Viene dall'*energia* dei campi gluonici all'interno della particella stessa.

«L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto energetico?» si era chiesto Einstein nel 1905. «Sì» è la risposta. Circa il 99 per cento della massa di protoni e neutroni è in realtà energia trasportata da gluoni privi di massa che tengono insieme i quark. «La massa, una proprietà della materia apparentemente irriducibile, sinonimo di resistenza al cambiamento e di inerzia,» scrive Wilczek «si rivela essere il riflesso di un'armoniosa interazione tra simmetria, indeterminazione ed

Glashow fece visita al Brookhaven nell'agosto del 1974, per esortare ancora una volta gli sperimentali a cercare il quark charm. Ad ascoltarlo c'era anche Samuel Ting, che si stava preparando a usare il sincrotrone a gradiente alternato (AGS) per studiare collisioni protone-berillio ad alta energia e cercare accuratamente coppie elettrone-positrone in mezzo al caos di particelle prodotte.

Quando i dati rivelarono che le coppie elettrone-positrone si accumulavano in una stretta «risonanza» a un'energia di circa 3 GeV, gli sperimentali rimasero un po' spiazzati. Cercarono di eliminare le fonti di errore più ovvie, e ricontrollarono i dati. Non era cambiato nulla: il picco rimaneva ostinatamente centrato a 3,1 GeV, e ostinatamente stretto. Cominciarono a sospettare che si potesse trattare di nuova fisica.

Ting era cauto. Era diventato famoso per aver trovato errori negli esperimenti di altri fisici, e non voleva che succedesse a lui. Resistette alle pressioni che lo spingevano a pubblicare i risultati, in attesa della possibilità di riconfermare i dati.

Nel frattempo a Stanford, sull'altra costa degli Stati Uniti, Roy Schwitters aveva un problema. Gli anelli asimmetrici SPEAR (Stanford Positron Electron Asymmetric Rings), usati per far collidere elettroni e positroni, avevano cominciato a lavorare a pieno ritmo allo SLAC a metà del 1973. Schwitters aveva trovato un errore in uno dei programmi usati per analizzare i dati dagli esperimenti di SPEAR. Quando lo corresse, i dati rianalizzati degli esperimenti condotti nel giugno 1974 mostrarono segni di una struttura—lievi accumuli a 3,1 e a 4,2 GeV. Burton Richter, capo del progetto, si convinse a riconfigurare SPEAR per energie di collisione attorno ai 3,1 GeV, così da poter dare un'altra occhiata.

A novembre del 1974 era ormai chiaro che il gruppo di Ting al Brookhaven e quello di Richter allo SLAC avevano scoperto la stessa particella, un mesone formato da un quark charm e dal corrispondente antiquark. Il gruppo di Ting aveva deciso di chiamarla particella J, quello di Richter l'aveva invece battezzata psi (ψ). La scoperta simultanea rimase famosa come «rivoluzione di novembre».

Ne seguì un certa spaccatura sulle priorità. Nessuno dei due gruppi era disposto a cedere adottando il nome proposto dall'altro, e ancor oggi la particella è chiamata J/ψ . Ting e Richter si divisero il Nobel per la Fisica nel 1976.

La scoperta della J/ψ fu un trionfo della fisica teorica e sperimentale. Servì anche a mettere meglio a fuoco lo schema strutturale delle particelle fondamentali, le fondamenta di quello che

stava diventando il Modello Standard della fisica delle particelle.

C'erano ora due «generazioni» di particelle fondamentali di materia, ciascuna consistente di due leptoni e due quark, e delle particelle mediatrici delle interazioni. L'elettrone, il neutrino dell'elettrone, il quark *u* e il quark *d* formano la prima generazione; il muone, il neutrino del muone, il quark *s* e il quark *c* (charm) formano la seconda generazione, distinta dalla prima per la massa. I fotoni trasportano la forza elettromagnetica, le particelle *W* e *Z* quella debole, e otto gluoni colorati trasportano la forza nucleare forte, o forza di colore, che agisce tra quark colorati.

Nella primavera del 1977 si erano però accumulate prove schiaccianti dell'esistenza di una versione ancor più pesante dell'elettrone, chiamata leptone tau. Non era esattamente quello che i fisici volevano sentire.

Un leptone tau richiedeva un neutrino tau e, inevitabilmente, si fece strada l'ipotesi che ci fossero in realtà *tre* generazioni di leptoni e quark. Nell'agosto 1977 Leon Lederman al Fermilab scoprì la *ypsilon* (*Y*), un mesone formato da quello che ormai era stato battezzato quark *b* (iniziale di *bottom*, «fondo») e dal corrispondente anti quark. Con una massa di circa 4,2 GeV, il quark *b* è una versione più pesante, di terza generazione, dei quark *d* e *s*, con carica $-1/3$. Si ipotizzava che l'ultimo membro della terza generazione, il quark «top», ancora più pesante, sarebbe stato trovato non appena si fossero costruiti acceleratori in grado di produrre le energie di collisione necessarie.

Nonostante la sua comparsa a sorpresa, la terza generazione di leptoni e quark fu immediatamente assorbita nel Modello Standard (fig. 17). In un simposio organizzato al Fermilab nell'agosto 1979, furono presentate evidenze sperimentali della comparsa di «getti» (*jet*) di quark e gluoni prodotti in esperimenti di collisione elettrone-positrone. Si tratta di spruzzi collimati di adroni prodotti dalla formazione di coppie quark-antiquark in cui viene anche «liberato» un gluone molto energetico. Questi «eventi a tre getti» costituiscono la prova più lampante finora trovata dell'esistenza sia dei quark sia dei gluoni.

Mancava ancora all'appello il quark top, così come l'evidenza diretta delle particelle *W* e *Z*, mediatrici della forza debole. Mentre il Modello Standard diventava la nuova ortodossia, Glashow, Weinberg e Salam appresero di aver vinto il Nobel per la Fisica 1979 per il loro lavoro sull'unificazione elettrodebole.

Cominciò quindi la gara per trovare le particelle che mancavano al completamento dello schema. Nella sua conferenza di accettazione del Nobel, Weinberg spiegò che la teoria elettrodebole prediceva una massa rispettivamente di circa 83 GeV per il *W* e di 94 GeV circa per la *Z*.⁸

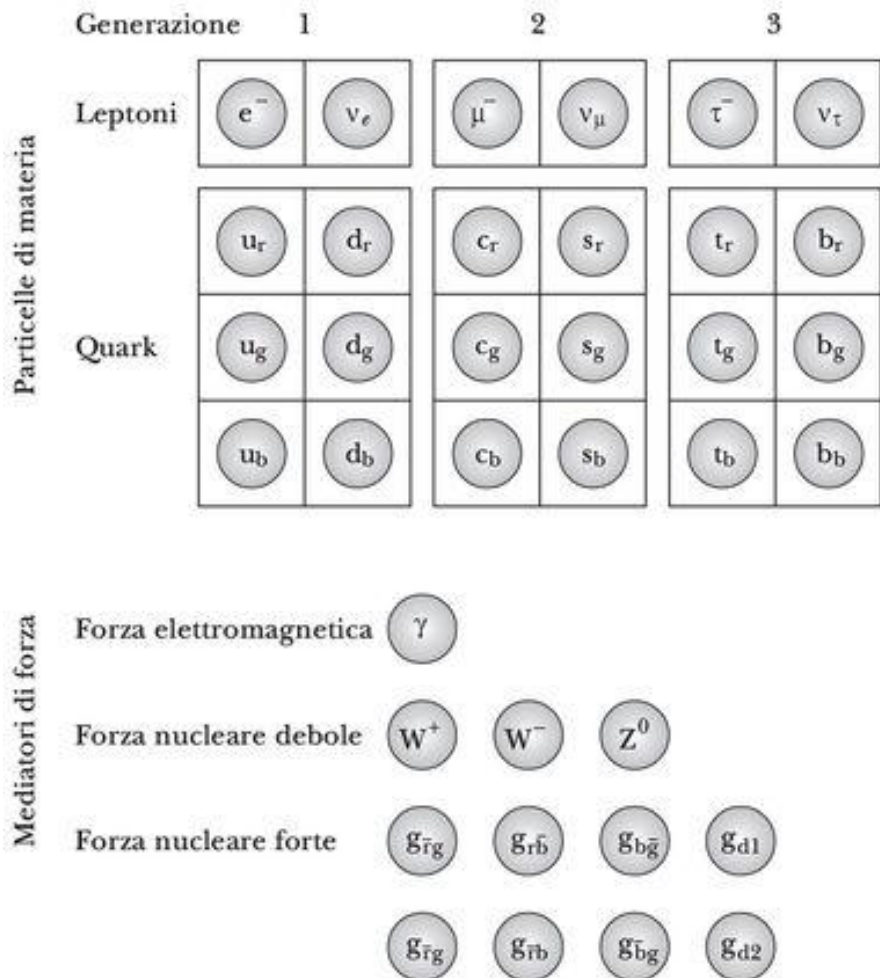


Figura 17 Il Modello Standard delle particelle elementari descrive le interazioni di tre generazioni di particelle di materia attraverso forze di tre tipi, mediate da particelle dette appunto «mediatori di forza».

Nel giugno 1976 il CERN aveva collaudato il SuperProto-Sincrotrone (SPS), un acceleratore di protoni capace di fornire alle particelle fino a 400 GeV di energia. Un mese prima del collaudo, queste energie erano state già superate dall'acceleratore di protoni del Fermilab, che aveva raggiunto i 500 GeV. Ma mandare le particelle a sbattere contro bersagli stazionari comporta un notevole spreco, dato che parte dell'energia va a finire nel moto in avanti delle particelle prodotte. In questo tipo di collisioni l'energia che può essere incanalata nella creazione di particelle nuove cresce solo come la radice quadrata dell'energia delle particelle del fascio.

Questo significava che le collisioni di particelle accelerate anche alle energie ora disponibili all'SPS o all'acceleratore del Fermilab avrebbero

potuto produrre solo nuove particelle di energia molto inferiore. Per raggiungere le energie predette per le particelle W e Z sarebbe stato necessario un acceleratore considerevolmente più grande di quelli costruiti fino ad allora.

Ma c'era un'alternativa. L'idea di far collidere due fasci di particelle accelerate era stata sviluppata negli anni Cinquanta. Se, una volta accelerate, le particelle fossero state immesse in due anelli di accumulazione, come fasci circolanti in direzioni opposte, si sarebbero prodotte delle collisioni frontali. In questo caso tutta l'energia delle particelle accelerate poteva venire sfruttata per la creazione di nuove particelle.

Collisori di particelle di questo genere furono costruiti per la prima volta negli anni Settanta. SPEAR fu uno dei primi, ma usava collisioni frontali tra leptoni (elettroni e positroni). Nel 1971 il CERN completò la costruzione degli Intersecting Storage Rings (ISR), un collisore adronico (protone-protone) che usava il protosincrotrone da 26 GeV come fonte di protoni. Questi venivano prima accelerati nel sincrotrone e quindi iniettati nell'ISR, dove venivano fatti collidere. Tuttavia, la massima energia di collisione (52 GeV) era insufficiente per produrre le particelle W e Z.

Nell'aprile del 1976, al CERN, un gruppo di studio si riunì per riferire sul successivo importante progetto del laboratorio, il LEP (Large Electron Positron collider, ossia «grande collisore di elettroni e positroni»), un anello che doveva essere costruito in un tunnel di 27 chilometri nel sottosuolo al confine tra Francia e Svizzera nei pressi di Ginevra. Il LEP avrebbe usato l'SPS per accelerare elettroni e positroni a velocità molto prossime a quella della luce per poi iniettarli nell'anello del collisore. Le collisioni avrebbero riguardato particelle (in questo caso elettroni) e antiparticelle (positroni) fatte circolare in verso opposto nello stesso anello. L'energia di progetto iniziale era 45 GeV per ciascuno dei fasci, corrispondente a un'energia delle collisioni frontali di 90 GeV, che avrebbe messo alla portata del LEP le particelle W e Z.

L'allora direttore del Fermilab, Robert Wilson, aveva mire ancora più grandiose. Voleva costruire un collisore adronico capace di raggiungere energie di collisione di 1 TeV (un teraelettronvolt, ossia 1000 GeV, mille miliardi di elettronvolt) e che sarebbe stato poi chiamato «Tevatron». Un collisore del genere avrebbe richiesto l'uso di magneti superconduttori, mai usati né sperimentati prima. Ed era solo una proposta di progetto.

Questa era la situazione che si trovavano di fronte i fisici delle particelle nel 1976. Al CERN l'SPS poteva accelerare particelle fino a 400 GeV e l'ISR poteva raggiungere energie di collisione di 52 GeV, troppo poco per trovare il W e la Z. In linea di principio avrebbe potuto farlo

il LEP, che però non sarebbe stato disponibile prima del 1989. L'anello principale (*Main Ring*) del Fermilab poteva accelerare particelle fino a 500 GeV, ma ancora non era sufficiente per il W e la Z. Il Tevatron, capace in teoria di raggiungere energie di collisione di 1 TeV, era ancora in fase di progettazione.

I fisici non avevano la pazienza di aspettare. «La pressione per la scoperta del W e della Z era così forte» ricorda il fisico del CERN Pierre Darriulat «che i lunghi tempi di progetto, sviluppo e costruzione del LEP lasciavano insoddisfatti anche i più pazienti di noi. Una rapida occhiata (anche se possibilmente non superficiale) ai nuovi bosoni sarebbe stata molto gradita». ⁹ Anche al Fermilab stavano cominciando a perdere la pazienza.

Quel che serviva ai fisici di qua e di là dall'Atlantico era capire come sfruttare al massimo le potenzialità degli apparati esistenti, in modo da raggiungere il regime energetico cruciale.

Una soluzione possibile era emersa alla fine degli anni Sessanta. In linea di principio si poteva trasformare un acceleratore in un collisore adronico facendo circolare fasci di protoni e di antiprotoni in verso opposto nell'anello di un acceleratore, per poi farli collidere frontalmente. Un collisore protone-protone richiedeva due anelli distinti e incrociati, con protoni che circolano in versi opposti; le collisioni protone-antiprotone potevano invece avvenire nello stesso anello. E questo avrebbe permesso di ottenere energie di collisione fino al doppio della più alta energia raggiungibile con gli acceleratori esistenti.

Ma non era una cosa semplice. Gli antiprotoni si producono facendo collidere protoni di alta energia con bersagli fissi (per esempio di rame). Per produrre un singolo antiprotone servono un milione di queste collisioni. Ancora peggio, gli antiprotoni sono prodotti con un ampio spettro di energie, troppo vasto per permettere di immagazzinarli in un anello di accumulazione. Solo una piccola frazione degli antiprotoni prodotti in questo modo riuscirebbe a «sistemarsi» nell'anello, riducendo di molto sia l'intensità del fascio di antiprotoni, sia la *luminosità*, una misura del numero di collisioni che i fasci possono produrre.

Per ottenere un fascio di antiprotoni che garantisse una luminosità accettabile in esperimenti di collisione protone-antiprotone sarebbe stato necessario in qualche modo «raggruppare» le energie degli antiprotoni concentrandole attorno all'energia di fascio desiderata.

Per fortuna, era proprio ciò che aveva ideato il fisico olandese Simon van der Meer. Laureatosi all'Università tecnologica di Delft nel 1952, dopo aver lavorato per qualche anno alla Philips in Olanda Van

der Meer si era trasferito nel 1956 al CERN, dove era divenuto un teorico degli acceleratori; si occupava cioè prevalentemente dell'applicazione di principi teorici alla progettazione e alla messa in funzione degli acceleratori e dei collisori di particelle.

Van der Meer aveva condotto qualche esperimento esplorativo con l'ISR nel 1968, ma solo quattro anni dopo pubblicò una nota interna sui risultati ottenuti. Il motivo del ritardo era semplice: la fisica che stava perseguendo appariva vagamente folle: «L'idea sembrava troppo campata per aria all'epoca, per giustificare la pubblicazione».10

Gli esperimenti del 1968 avevano suggerito che fosse in realtà possibile concentrare antiprotoni dallo spettro inizialmente largo in un intervallo di energie molto più stretto, tale da permetterne l'immissione in un anello di accumulazione. La tecnica comportava l'uso di elettrodi «sensori» che rilevassero la presenza di protoni lontani dall'energia di fascio desiderata e inviassero un segnale a un elettrodo «impulsatore», il quale li avrebbe riallineati agli altri. Il segnale passato dall'elettrodo sensore all'impulsatore è un po' come il fischio del pastore al cane: sentendolo, il cane abbaia e rimette in riga la pecora che sgarra, permettendo al gregge di essere ricondotto ordinatamente all'ovile.

Van der Meer battezzò la tecnica «raffreddamento stocastico». L'aggettivo «stocastico» significa semplicemente «casuale», mentre «raffreddamento» non si riferisce alla temperatura in senso stretto, ma ai moti casuali e alla larghezza della distribuzione in energia delle particelle contenute nel fascio. Ripetendo il processo milioni di volte, poco alla volta si sarebbe ottenuta l'energia di fascio desiderata. Nel 1974 Van der Meer condusse nuovi esperimenti di raffreddamento stocastico usando l'ISR. I risultati non furono molto rilevanti, ma sufficienti a indicare che il principio funzionava.

Nel frattempo Carlo Rubbia aveva accantonato la delusione per essere stato battuto dal CERN nella scoperta delle correnti neutre. Rubbia aveva studiato alla Scuola Normale Superiore di Pisa e nel 1959 aveva conseguito il dottorato alla Columbia University, dove aveva lavorato su diversi aspetti della fisica dei muoni; si era quindi trasferito al CERN nel 1961. A causa dei suoi frequenti spostamenti era stato soprannominato dai suoi studenti di Harvard «professor Alitalia».

Rubbia era cocciuto, determinato e ambizioso, nonché famoso come persona con cui è difficile lavorare.¹¹ Aveva deciso che *non* sarebbe stato battuto nella scoperta del W e della Z.

Assieme a colleghi di Harvard, a metà del 1976 Rubbia aveva inviato a Wilson alcune proposte per convertire il protosincrotrone da 500 GeV del Fermilab in un collisore protone-antiprotone. Wilson aveva declinato, preferendo concentrare le proprie forze sulla raccolta di fondi per il Tevatron. La tecnica del raffreddamento stocastico

sembrava una sparata. Se non funzionava, si sarebbe perso tempo potenzialmente prezioso sul sincrotrone. Wilson accettò invece la proposta di un esperimento da mezzo milione di dollari con una macchina di piccola scala per scoprire se la tecnica funzionava.

Rubbia riprese la sua proposta e la portò con sé al CERN, dove fu accolta in modo decisamente più positivo da Leon van Hove, all'epoca direttore generale. Era il giugno del 1978, e nel frattempo nuove prove condotte dal CERN sul raffreddamento stocastico avevano dato risultati molto incoraggianti; Van Hove era disposto a scommetterci. Per il CERN era l'occasione per scoprire nuove particelle, cosa che da qualche anno era appannaggio esclusivo dei laboratori americani. E d'altra parte, se Van Hove non avesse accettato, quasi certamente Rubbia sarebbe tornato da Leon Lederman, che al Fermilab aveva preso il posto del dimissionario Wilson in febbraio.¹² «Se il CERN non fosse rimasto convinto dell'idea di Carlo, molto probabilmente lui l'avrebbe rivenduta al Fermilab» spiega Darriulat.¹³

Rubbia ebbe il via libera per formare una collaborazione di fisici che progettassero il complesso apparato sperimentale necessario alla scoperta del W e della Z. Poiché questo sarebbe stato costruito in una grande area sotterranea contigua all'SPS, la collaborazione fu chiamata UA1 (Underground Area 1). Il team crebbe fino a contare circa centotrenta fisici.

Sei mesi dopo la decisione si formò una seconda collaborazione indipendente, UA2, diretta da Darriulat, meno numerosa, (circa cinquanta fisici), e con lo scopo di instaurare un'amichevole competizione con UA1. L'apparato sperimentale di UA2 sarebbe stato meno elaborato (non sarebbe stato in grado di rivelare i muoni, per esempio), ma nondimeno avrebbe potuto suffragare in maniera indipendente i risultati di UA1.

Un'energia di fascio di 270 GeV sia per i protoni sia per gli antiprotoni avrebbe dato luogo nell'SPS a energie di collisione di 540 GeV, più che sufficienti per produrre le particelle W e Z.

Dopo alcuni ritardi, UA1 e UA2 cominciarono finalmente a registrare dati nell'ottobre del 1982. Si sapeva che le collisioni con produzione di W e Z sarebbero state molto rare, quindi entrambi gli apparati furono predisposti in modo da rispondere solo a collisioni di un certo tipo, conformi a criteri preprogrammati. Il collisore avrebbe prodotto diverse migliaia di collisioni al secondo per un periodo di due mesi. Ci si aspettava solo una manciata di eventi che generassero un W o una Z.

Gli apparati sperimentali furono programmati per identificare eventi caratterizzati dalla presenza di elettroni o positroni di alta energia

emessi a grandi angoli rispetto alla direzione dei fasci. Un elettrone con un'energia fino a circa la metà della massa del W sarebbe stato il marchio del decadimento di un W^- ; analogamente, positroni molto energetici avrebbero indicato il decadimento di un W^+ . Uno sbilanciamento apparente nella quantità di moto dei prodotti di decadimento avrebbe segnalato la concomitante produzione di neutrini o antineutrini, che non si possono rivelare direttamente.

I risultati preliminari furono presentati durante un convegno a Roma a inizio gennaio 1983. L'annuncio fu dato da Rubbia, insolitamente agitato. Su diversi milioni di collisioni osservate, UA1 aveva identificato sei eventi candidati a contenere decadimenti di W. UA2 ne aveva identificati quattro. Sebbene un tantino esitante, Rubbia era convinto: «Alla vista sembrano W, all'olfatto sembrano W, devono essere W». ¹⁴ «La sua conferenza fu uno spettacolo» scrive Lederman. «[Rubbia] aveva tutte le qualità di uno showman per presentarli [i dati] con logica e passione». ¹⁵

Il 20 gennaio 1983 i fisici del CERN si ammassarono nell'auditorio principale per ascoltare due seminari tenuti da Rubbia per UA1 e da Luigi Di Lella per UA2. Il 25 gennaio fu convocata una conferenza stampa. La collaborazione UA2 preferì sospendere il giudizio, ma il giudizio stava arrivando. La particella W era stata scoperta, a un'energia vicina ai previsti 80 GeV.

La scoperta della Z_0 da parte di UA1, a una massa di circa 95 GeV, fu annunciata il 1° giugno 1983. Questa volta ci si basava sull'osservazione di cinque eventi, quattro con una coppia elettrone-positrone e uno con una coppia di muoni. Anche la collaborazione UA2 aveva accumulato qualche evento candidato, ma preferì aspettare i risultati di un ulteriore periodo di presa dati, per poi pubblicare l'osservazione di otto eventi con coppie elettrone-positrone.

Alla fine del 1983 UA1 e UA2 avevano raccolto in tutto un centinaio di eventi $W^\pm$ e una dozzina di Z_0 , che si rivelavano avere massa rispettivamente attorno agli 81 e ai 93 GeV.

Nel 1984 Rubbia e Van der Meer ricevettero il premio Nobel per la Fisica.

Il lungo viaggio era cominciato, secondo alcuni, con l'articolo fondamentale di Yang e Mills del 1954 su una teoria di gauge SU(2) della forza nucleare forte: la teoria prevedeva quei bosoni privi di massa che tanto irritarono Pauli. Nel 1957 Schwinger aveva ipotizzato che la forza nucleare debole fosse mediata da tre particelle di campo, e il suo studente Glashow le aveva in seguito inquadrato in una teoria di Yang-Mills SU(2).

La scoperta del meccanismo di Higgs nel 1964 aveva mostrato come

bosoni di questo genere privi di massa potessero acquisirla. Weinberg e Salam avevano applicato il meccanismo alla rottura spontanea di simmetria nel 1967-68. La dimostrazione che la teoria risultante era rinormalizzabile era arrivata nel 1971. E ora i mediatori della forza debole erano stati scoperti, esattamente dove erano stati previsti.

L'esistenza stessa delle particelle W e Z alle masse previste costituiva una prova piuttosto convincente del fatto che la teoria elettrodebole $SU(2) \times U(1)$ era fundamentalmente corretta. Ma se la teoria è corretta, allora a dare massa ai mediatori di forza sono le interazioni con un campo energetico onnipervasivo (il campo di Higgs). E se esiste il campo di Higgs, deve esistere anche il bosone di Higgs.

Ma per scoprire il bosone di Higgs era necessario un collisore ancora più grande.

Nel quale Ronald Reagan scommette tutto sul Superconducting Supercollider, ma quando, sei anni dopo, il progetto viene cancellato dal Congresso tutto quel che ne rimane è un buco nel Texas.

Ciò che i fisici avevano imparato dall'esperienza con l'unificazione elettrodebole si poteva applicare adesso anche a un problema più vasto. La teoria elettrodebole implicava che, pochi istanti dopo il big bang, all'altissima temperatura a cui si trovava l'universo la forza nucleare debole e quella elettromagnetica fossero indistinguibili, confuse in un'unica forza elettrodebole trasportata da bosoni privi di massa.

È la cosiddetta «epoca elettrodebole». Al raffreddarsi dell'universo, il campo di Higgs di fondo si è «cristallizzato» e la simmetria di gauge della forza elettrodebole si è rotta (o meglio, «nascosta»). I bosoni senza massa dell'elettromagnetismo (i fotoni) hanno continuato a rimanere liberi, mentre i bosoni della forza debole, interagendo col campo di Higgs, hanno acquisito una massa mutandosi nelle particelle W e Z. Il risultato è che, in termini di intensità dell'interazione e di raggio d'azione, le forze debole ed elettromagnetica ora appaiono molto diverse.

Nel 1974 Weinberg, assieme a Howard Georgi e a Helen Quinn, dimostrò che le intensità delle tre forze fondamentali tra particelle diventano quasi uguali a energie comprese tra cento miliardi e cento milioni di miliardi di GeV.¹ Queste energie, corrispondenti a temperature di circa dieci miliardi di miliardi di miliardi (10^{28}) di gradi, sarebbero state prevalenti nell'universo circa un centomillesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo (10^{-35}) di secondo dopo il big bang.

Sembra ragionevole supporre che in questa «epoca della grande unificazione» anche la forza nucleare forte e quella elettrodebole fossero indistinguibili e fuse in un'unica forza «elettronucleare». Tutti i mediatori di forza erano identici e non esistevano massa, carica elettrica, sapore (u, d) o colore (rosso, verde, blu) dei quark. Rompere questa simmetria, più estesa della precedente, richiederebbe altri

campi di Higgs, cristallizzatisi a temperature più alte determinando una divisione tra quark, elettroni e neutrini e tra la forza debole e quella forte.

Uno dei primi esempi di una simile teoria di grande unificazione (GUT) fu sviluppato da Glashow e Georgi nel 1974:² era basato sul gruppo di simmetria $SU(5)$, definito dagli autori il «gruppo di gauge del mondo».³ Una conseguenza della simmetria più estesa era che tutte le particelle elementari erano diventate semplicemente diverse sfaccettature l'una dell'altra. La teoria di Glashow e Georgi rendeva possibili le trasformazioni tra quark e leptoni: un quark all'interno di un protone si sarebbe cioè potuto trasformare in un leptone. «A quel punto mi resi conto che avevo reso il protone, il mattone fondamentale dell'atomo, instabile» ricorda Georgi. «Profondamente depressi, andai a dormire».⁴

Poiché la grande unificazione si verifica solo a energie che non potranno mai essere ottenute su collisori terrestri, può sorgere la tentazione di mettere in dubbio il valore di teorie come questa. Tuttavia, le GUT prevedono l'esistenza di nuove particelle, che in linea di principio possono essere rivelate in esperimenti di collisioni. E l'epoca della grande unificazione, pur se finita miliardi di anni fa, ha lasciato una impronta durevole sull'universo che possiamo osservare oggi.

Almeno questa era la logica seguita del giovane fisico Alan Guth. Questi aveva confermato che tra le nuove particelle predette dalle teorie di grande unificazione c'era il *monopolo magnetico*, un'unità di «carica» magnetica equivalente a un polo nord o sud isolato. Nel maggio 1979 Guth aveva cominciato a lavorare con il collega Henry Tye per determinare il numero probabile di monopoli magnetici prodotti dal big bang. Il loro intento era spiegare perché, se nell'universo primordiale si sono formati davvero monopoli magnetici, nessuno di questi è visibile oggi.

Guth e Tye si resero conto che potevano sopprimere la formazione di monopoli cambiando la natura della transizione di fase dall'epoca di grande unificazione a quella elettrodebole. Si trattava di trafficare con le proprietà dei campi di Higgs coinvolti. I due studiosi scoprirono che i monopoli sarebbero spariti se, invece di una normale transizione di fase o «cristallizzazione» alla temperatura di transizione, l'universo fosse stato soggetto al fenomeno del *sovraraffreddamento*. In questo scenario la temperatura scende così rapidamente che l'universo rimane nello stato di grande unificazione ben al di sotto della temperatura di transizione.⁵

Quando, nel dicembre 1979, Guth esplorò gli effetti ulteriori del sovraraffreddamento, scoprì che esso comportava un periodo di espansione straordinaria dello spazio-tempo. Inizialmente piuttosto

concertato dal risultato, Guth si rese presto conto che questa espansione esplosiva riusciva a spiegare caratteristiche importanti dell'universo osservabile là dove la cosmologia più in voga, quella del big bang, invece falliva. «Non ricordo di aver cercato di inventare un nome per questo straordinario fenomeno dell'espansione esponenziale,» scrive Guth «ma il mio diario mostra che da fine dicembre avevo cominciato a chiamarlo *inflazione*».6

La cosmologia inflazionaria ha subito alcune modifiche perlopiù in seguito a ulteriori manipolazioni delle proprietà dei campi di Higgs usati per rompere la simmetria alla fine dell'epoca di grande unificazione. Le prime teorie prevedevano troppa uniformità, il che implicava un universo piuttosto monotono e privo di strutture – senza stelle, pianeti, galassie. I cosmologi cominciarono a rendersi conto che i semi di queste strutture osservabili dovevano provenire da fluttuazioni quantistiche nell'universo primordiale, amplificate dall'inflazione. Ma per permettere questo il campo di Higgs doveva avere proprietà incompatibili con quelle del campo di Higgs delle teorie GUT di Glashow-Georgi.

In ogni caso i risultati sperimentali disponibili all'inizio degli anni Ottanta confermavano che il protone è più stabile di quanto implicato dalla teoria di Georgi e Glashow.7 Non più vincolati da teorie nate nell'ambito della fisica delle particelle, i cosmologi erano liberi di adattare la teoria all'universo osservabile giocando con i campi di Higgs, ribattezzati con l'unico nome di *inflatone* per sottolinearne il significato. Le loro previsioni furono confermate in maniera spettacolare nell'aprile 1992 dai risultati del satellite COBE (COsmic Background Explorer), che aveva redatto una mappa delle minuscole variazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo, il residuo freddo della radiazione separatasi dalla materia circa quattrocentomila anni dopo il big bang.8

Brout, Englert, Higgs, Guralnik, Hagen e Kibble avevano inventato il campo di Higgs come strumento per rompere le simmetrie alla base delle teorie di Yang-Mills. Weinberg e Salam avevano mostrato come applicare il trucco alla rottura di simmetria elettrodebole, e la tecnica era stata usata per predire correttamente la massa del W e della Z. Lo stesso accorgimento, usato in seguito per rompere la simmetria della forza elettrodebole, ha avuto conseguenze sorprendenti e ha portato alla scoperta della cosmologia inflazionaria, e alla previsione precisa della struttura su larga scala dell'universo.

Il concetto totalmente teorico di campi di Higgs e quello dei «falsi vuoti» implicati da tali campi erano divenuti centrali sia per il Modello Standard della fisica delle particelle, sia per quello, emergente, della cosmologia del big bang. Questi campi di Higgs esistevano davvero? C'era solo un modo per scoprirlo.

I bosoni dei campi di Higgs di grande unificazione hanno una massa enorme, decisamente fuori portata per qualunque acceleratore. Tuttavia, sebbene la massa del bosone di Higgs elettrodebole originale si fosse dimostrata difficile da predire con certezza, a metà degli anni Ottanta si era sicuri che fosse alla portata della successiva generazione di collisori.

I fisici delle particelle americani si stavano ancora rodendo il fegato per essere stati battuti dai rivali europei sulla scoperta del W e della Z. Un editoriale del «New York Times» del giugno 1983 dichiarava: «Europa 3, USA nemmeno Z zero», sostenendo che i fisici europei stavano ormai conducendo la gara per la scoperta dei mattoni fondamentali della natura.⁹ I fisici statunitensi volevano la rivincita. Il bosone di Higgs doveva essere scoperto in un laboratorio americano.

Il 3 luglio 1983 al Fermilab fu acceso per la prima volta l'acceleratore Tevatron. Dodici ore più tardi il fascio all'interno dell'anello di 6 chilometri aveva raggiunto l'energia di progetto di 512 GeV. Facendo collidere protoni e antiprotoni, l'energia raggiunta sarebbe stata di 1 TeV. Era costato 120 milioni di dollari. ISABELLE, un nuovo collisore protone-protone già in costruzione al Brookhaven, fu a questo punto giudicato obsoleto: in luglio il progetto fu cancellato dalla commissione per la fisica delle alte energie del dipartimento per l'Energia statunitense.

Al CERN stavano per iniziare i lavori di costruzione del LEP, alloggiato in un tunnel circolare di 27 chilometri di circonferenza a circa 150 metri di profondità sotto il confine franco-svizzero: il progetto di ingegneria civile più grande mai realizzato in Europa. Ma il LEP era stato pensato come fabbrica di W e Z, da usare per affinare la conoscenza delle nuove particelle e come strumento per cercare il quark top. La caccia al bosone di Higgs non era la sua priorità.

Il Tevatron poteva offrire qualche opportunità di vedere il bosone di Higgs, ma non c'erano garanzie a riguardo. Era tempo di pensare in grande. Lederman aveva proposto in precedenza un enorme salto in avanti: un gigantesco collisore protone-protone fondato sull'uso di magneti superconduttori e capace di energie di collisione fino a 40 TeV. Lo aveva chiamato «Desertron», perché avrebbe dovuto essere costruito in una vasta pianura deserta e perché sarebbe stata una macchina capace di attraversare il «deserto energetico», il grande intervallo di energie privo, secondo le teorie GUT, di nuova fisica interessante. Da Desertron divenne Very Big Accelerator (VBA). Avendo cancellato ISABELLE, la commissione premette perché venisse data la priorità al VBA, subito ribattezzato Superconducting SuperCollider (SSC).

Il progetto dell'SSC fu completato alla fine del 1986. Il costo previsto,

4,4 miliardi di dollari, lo proiettava al vertice dei progetti scientifici americani e richiedeva l'approvazione del presidente. A Lederman fu chiesto di realizzare un video di dieci minuti sul progetto, da mostrare al presidente Ronald Reagan. Lederman colse l'occasione per far presa sullo spirito pionieristico di Reagan, tracciando un'analogia diretta tra l'esplorazione di regioni incognite della fisica delle particelle e l'esplorazione del West americano.

La presentazione ufficiale del progetto ^{ssc} di fronte a Reagan e ai suoi collaboratori alla Casa Bianca si tenne nel gennaio 1987. Le argomentazioni pro e contro rimbalzavano avanti e indietro. Il responsabile del Bilancio sostenne che l'approvazione avrebbe avuto come unico risultato quello di far contenti un po' di fisici. Reagan rispose che in verità era una cosa da tenere in considerazione, dato che lui, a scuola, aveva reso molto infelice il suo insegnante di fisica.

Una volta esposti i pro e contro, l'attenzione di tutti si volse verso Reagan, cui spettava la decisione finale. Reagan lesse una citazione di Jack London: «Preferirei che la mia fiamma bruciasse in una vampa brillante piuttosto che venire ricoperto dalla muffa»,¹⁰ spiegando che era la frase citata dal famoso giocatore di football americano Ken Stabler, detto «Snake». Stabler aveva portato gli Oakland Raiders alla vittoria del Super Bowl nel 1977, ed era noto per la precisione nei passaggi e per uno in particolare, detto «Ghost to the Post» («Fantasma alla meta»): un passaggio di oltre 40 metri a Dave Casper (soprannominato «Ghost») che permise alla sua squadra di pareggiare all'ultimo minuto ai playoff contro i Baltimore Colts. La partita andò ai supplementari e alla fine vinsero i Raiders.

Stabler aveva adattato la citazione di Jack London al suo modo di affrontare il football americano. «Lancia lungo» aveva detto.¹¹ Nei momenti critici, è meglio adottare la strategia più rischiosa.

Reagan, un eroe del cinema americano di serie B prima di entrare in politica nel 1964, era stato soprannominato «The Gipper» per aver interpretato George Gipp, giocatore di football morto all'età di 25 anni, nel film *Knute Rockne: All American* (1940). Il film contiene la famosa battuta: «L'ultima cosa che mi disse George fu: "Rock, quando sono in difficoltà e la sfortuna li tormenta, di' ai ragazzi di raccogliere tutte le energie e di vincere per il Gipper"». ¹²

Senza alcun dubbio Reagan si sentì in profonda sintonia con l'idea dell'^{ssc}. Già abbagliato dalla promessa che la scienza potesse fornire all'America un'ultima linea di difesa nella forma del progetto Strategic Defense Initiative, soprannominato «Guerre stellari», era ora più che mai deciso a raccogliere tutte le energie nell'interesse della supremazia scientifica americana. Il Gipper era pronto a lanciare lungo.

Il progetto era stato approvato, ma rimanevano parecchi dubbi. Nella sua richiesta, il dipartimento dell'Energia aveva spiegato che l'ssc sarebbe stata un'impresa internazionale, sostenuta da contributi finanziari di altri paesi. Ma la retorica dei fisici americani fece sfumare la cosa. Perché mai gli altri paesi avrebbero dovuto sostenere un progetto palesemente concepito per ripristinare la supremazia americana nella fisica delle alte energie? L'Europa d'altra parte era solidamente impegnata con il CERN. Non era dunque sorprendente lo scarso interesse suscitato dall'ssc di là dall'Atlantico.

All'interno della comunità dei fisici americani si era anche accumulato del risentimento, che ora si sfogava in recriminazioni aperte. Dato il costo così elevato, che cosa si sacrificava per finanziare la ricerca del bosone di Higgs? C'erano molti altri progetti, assai meno costosi presi singolarmente, che avevano di sicuro maggiori probabilità di portare a progressi tecnologici potenzialmente preziosi. Con i fondi a disposizione non era possibile finanziarli tutti se si fosse incluso l'ssc, e dunque molti di essi erano a rischio. La fisica delle alte energie valeva davvero mille volte di più di altri settori scientifici?

L'espressione *big science* acquisì una connotazione negativa.

Il sostegno del Congresso e del Senato all'ssc rimasero saldi fintanto che rimase ignota la sede in cui sarebbe stato costruito il nuovo acceleratore. Le accademie nazionali della scienza e della tecnica ricevettero quarantatré proposte da venticinque Stati. Il governo del Texas istituì una commissione e promise un miliardo di dollari di fondi se l'ssc fosse stato costruito sul suo territorio. Avrebbe avuto molto più senso costruirlo al Fermilab, dove erano già installate molte delle infrastrutture e dove risiedevano molti dei fisici che avrebbero preso parte al progetto. Ma nel novembre del 1988 le accademie nazionali decisero che l'ssc sarebbe stato costruito in una formazione geologica del Cretaceo chiamata Austin Chalk, sotto le praterie texane della contea di Ellis, un tempo ricca di cotone.

Il texano George Bush, vicepresidente durante il mandato di Reagan, gli era succeduto alla presidenza solo due giorni prima dell'annuncio. Non vi era nessun sospetto di parzialità nella decisione delle accademie nazionali, ma Bush divenne un forte sostenitore del progetto. Ora che la sede era nota, tuttavia, l'appoggio degli altri senatori e membri del Congresso cominciò a venir meno.

I fisici dovettero lottare strenuamente per spremere fondi dal Congresso, e ogni volta che se ne ridiscuteva venivano chiamati a testimoniare a favore del progetto. Nel frattempo le previsioni di spesa lievitavano, man mano che diventava più chiaro che cosa comporti costruire un gigantesco anello di magneti superconduttori. Quando, nel 1990, fu dato il via libera alla costruzione, la stima di spesa era

salita a otto miliardi di dollari, quasi il doppio di quella iniziale.

A Austin Chalk furono eseguite perforazioni di prova, e nei pressi di Waxahachie, su una porzione dei quasi 7000 ettari di terreno che il governo texano aveva riservato al progetto, furono costruite alcune delle infrastrutture. Furono realizzati laboratori per lo sviluppo e il collaudo dei magneti, nonché grandi strutture per l'alloggiamento delle unità di refrigerazione necessarie per produrre e far circolare l'elio liquido usato per mantenere a temperature bassissime i magneti superconduttori.

Si formarono due collaborazioni sperimentali, legate ciascuna a un diverso apparato di rivelazione. La Solenoidal Detector Collaboration (SDC) avrebbe annoverato un migliaio tra fisici e ingegneri provenienti da più di cento istituti nel mondo. Il rivelatore sarebbe stato di tipo *general purpose*, ossia «multifunzione», e sarebbe costato 500 milioni di dollari; la speranza era che iniziasse a raccogliere dati prima della fine del 1999. In competizione con SDC era previsto il gruppo Gamma, Elettroni e Mu (*GEM*), di dimensioni simili.

Molti fisici accettarono la scommessa e chiesero un periodo di congedo dal proprio istituto, o addirittura diedero le dimissioni per partecipare al progetto *SSC*. A Waxahachie e nei dintorni si ritrovarono circa duemila persone. Per un esterno, ignaro delle questioni politiche legate all'*SSC*, tutta questa attività doveva apparire rassicurante. Si costruivano laboratori, si eseguivano perforazioni, arrivava un gran numero di persone.

Ma c'erano altri segnali non molto incoraggianti. L'amministrazione americana era alle prese con un deficit di bilancio già grande, e in crescita. Il presidente Bush tornò a mani vuote da una visita in Giappone nel gennaio del 1992: insistendo sul fatto che l'*SSC* non era un progetto internazionale, i giapponesi avevano rifiutato di sostenerlo finanziariamente. Il malcontento riguardo alla «scienza in grande» andava crescendo. In giugno la Camera dei Rappresentanti votò un emendamento al bilancio federale che avrebbe chiuso il progetto *SSC*, il quale sopravvisse grazie all'intervento del Senato.

Tracce del pessimismo che si stava diffondendo attorno al progetto si trovano nel libro divulgativo di Weinberg *Il sogno dell'unità dell'universo*, pubblicato nel 1993. Scrive Weinberg:¹³

Nonostante le costruzioni e gli scavi, sapevo che il finanziamento del progetto poteva ancora interrompersi. Riuscivo a immaginarmi i pozzi di prova chiusi e il Complesso dei Magnetismi vuoto, con pochi agricoltori che ricordavano, sempre più vagamente, che una volta era stato progettato un grande laboratorio scientifico nella contea di Ellis. Forse ero stregato dall'ottimismo vittoriano di Huxley, ma non riuscivo a credere

che questo sarebbe accaduto o che nella nostra epoca sarebbe stata abbandonata la ricerca delle leggi finali della natura.

Nel più visionario libro di Lederman *La particella di Dio*, pubblicato lo stesso anno, l'autore è bruscamente risvegliato da un sogno in cui stava chiacchierando amabilmente con il filosofo greco Democrito:¹⁴

«Merda». Mi ritrovavo di nuovo a casa mia, la testa penzolante sulle mie carte. Mi capitò sotto gli occhi la fotocopia di un titolo di giornale: «IN FORSE AL CONGRESSO I FINANZIAMENTI AL SUPER COLLISORE». Il mio modem stava facendo bip bip, e un messaggio giunto tramite la posta elettronica mi portava l'«invito» a recarmi a Washington per essere ascoltato dalla commissione del senato sull'ssc.

Nel novembre 1992 Bill Clinton vinse le elezioni presidenziali battendo George Bush e l'uomo d'affari texano Ross Perot. Nel giugno dell'anno successivo le stime di spesa per l'ssc erano salite a 11 miliardi di dollari, e la Camera dei Rappresentanti votò ancora una volta contro il progetto. Come fece notare Raphael Kasper, codirettore del progetto: «Votare contro l'ssc divenne a un certo punto simbolico, un esempio di responsabilità fiscale: un bel progetto costoso da affossare con il voto».¹⁵

Clinton mantenne un atteggiamento incoraggiante, ma si impegnò meno di Reagan e Bush in favore del progetto. La gara per la supremazia stava ora assumendo la forma di un programma da 25 miliardi per la costruzione della International Space Station, sempre con sede in Texas, a Houston, presso il Johnson's Space Center della NASA.

Nel settembre 1993 Weinberg, Richter e Lederman fecero un ultimo disperato tentativo di salvare i finanziamenti all'ssc. Stephen Hawking inviò un messaggio di sostegno in video. Tutto inutile.

In ottobre la Camera dei Rappresentanti approvò di misura (un voto di scarto) il progetto International Space Station. Il giorno successivo votò contro l'SSC, con maggioranza dei due terzi. Questa volta non ci fu alcun rinvio. Furono stanziati fondi per dismettere le strutture già costruite. Erano stati scavati circa 23 chilometri di tunnel ed erano stati spesi due miliardi di dollari, ma nemmeno un ottimismo vittoriano poteva ormai mantenere in vita il progetto (fig. 18). L'ssc era morto.

Nella prefazione del suo romanzo *A hole in Texas* («Un buco nel Texas»), il premio Pulitzer Herman Wouk scrive:¹⁶

Da quando avevano inventato la bomba atomica e quella a idrogeno, i fisici delle particelle erano diventati i cocchi di mamma del Congresso. Ma improvvisamente, e bruscamente,

tutto questo finì. Ciò che rimaneva dell'abortita ricerca del bosone di Higgs era solo un buco nel Texas, un enorme buco abbandonato.
È ancora là.



Figura 18 Quando il progetto SSC fu cancellato dal Congresso degli Stati Uniti, nell'ottobre del 1993, erano già stati spesi 2 miliardi di dollari e scavati 23 chilometri di gallerie sotto la prateria del Texas.

Il 16 dicembre 1994, poco più di un anno dopo la cancellazione dell'SSC, gli Stati membri del CERN votarono lo stanziamento di 15 miliardi di dollari nell'arco di vent'anni per la trasformazione del LEP, alla fine della sua fruttuosa vita, in un collisore protone-protone. L'idea di un Large Hadron Collider (LHC) era stata discussa per la prima volta più di dieci anni prima, nel corso di un convegno tenutosi a Losanna nel marzo 1984. Il nuovo acceleratore avrebbe fornito energie di collisione di 14 TeV, meno della metà delle energie massime previste per l'SSC, ma più che sufficienti per la scoperta dell'Higgs.

Rubbia dichiarò che il CERN aveva deciso di «pavimentare il tunnel

del LEP con magneti superconduttori». [17](#)

Nel quale il bosone di Higgs viene spiegato in termini comprensibili perfino a un politico inglese e al CERN se ne intravedono tracce. L'LHC viene acceso ed esplode.

L'ssc era stata una grossa scommessa, e i fisici avevano perso. I malumori che avevano portato alla cancellazione del progetto americano stavano cominciando ad affiorare anche in Europa. Il CERN beneficiava del fatto che il suo supporto finanziario non dipendeva da un'unica nazione. Ma i brontolii dei singoli Stati membri riguardo all'ammontare del proprio contributo potevano tradursi nella decisione di ritirare il sostegno. Nell'aprile 1993, solo sei mesi prima che la Camera dei Rappresentanti decidesse di cancellare definitivamente l'ssc, il ministro della Scienza inglese William Waldegrave lanciava una sfida alla comunità dei fisici delle alte energie britannici.

Waldegrave preannunciava un significativo cambiamento di rotta nella politica scientifica del governo conservatore guidato da John Major. Un libro bianco del governo, che avrebbe dovuto essere pubblicato il mese successivo, mirava a spostare l'enfasi della politica scientifica verso l'innovazione, con lo scopo ultimo di incentivare la creazione di ricchezza e migliorare la qualità di vita dei cittadini. In altre parole, lo scopo della scienza inglese era quello di servire gli interessi dell'economia britannica, a beneficio delle aziende pubbliche. L'organizzazione del sostegno governativo alla scienza e alle tecnologie sarebbe stata completamente rivoluzionata.

I segnali erano poco tranquillizzanti. La Gran Bretagna si stava ancora risollevando dopo la recessione innescata dal crollo dei mercati azionari dell'ottobre 1987, e difficilmente poteva permettersi il contributo annuale di 55 milioni di sterline al CERN. Mentre i fisici potevano indicare molti sviluppi tecnologici collaterali generati dal CERN, quali il progetto di fusione del formato ipertestuale con la rete internet che avrebbe portato all'invenzione del web da parte di Tim Barnes-Lee nel 1990, era probabilmente difficile spiegare in che modo la scoperta del bosone di Higgs avrebbe potuto contribuire in maniera

diretta alla creazione di ricchezza e al miglioramento della qualità di vita degli inglesi.

Per fortuna ai fisici non venne per il momento chiesto di fornire giustificazioni di quel tipo. Ma Waldegrave mise bene in chiaro che essi avrebbero dovuto adoperarsi parecchio per spiegare meglio quello che stavano cercando di fare.

Che cos'era, di preciso, questo bosone di Higgs? Perché era così importante da richiedere miliardi di dollari per scoprirlo? «Se mi aiutate a capirlo, c'è qualche probabilità in più che vi aiuti a trovare i soldi» disse Waldegrave all'uditorio della conferenza annuale del British Institute of Physics.¹ Aggiunse che se qualcuno fosse riuscito a spiegargli di che diavolo si stesse parlando, con parole semplici e su un foglio di carta, lo avrebbe ricompensato con una bottiglia di champagne d'annata.

Naturalmente, il diavolo di cui si stava parlando era il ruolo centrale rivestito dal campo di Higgs nella struttura del Modello Standard. Senza il campo di Higgs non ci potrebbe essere la rottura della simmetria elettrodebole.² Senza rottura di simmetria le particelle sarebbero prive di massa, come il fotone, e la forza elettrodebole sarebbe ancora unificata. Senza interazioni tra le particelle fondamentali e il campo di Higgs, non ci sarebbe massa: non ci sarebbe materia, non esisterebbero i pianeti, le stelle, la vita. E la prova diretta dell'esistenza di questo campo poteva venire solo dalla scoperta della particella associata, il bosone di Higgs. Trovato quello, si sarebbe capito in un batter d'occhio molto di più sulla vera natura del mondo materiale.

Spiegare il meccanismo di Higgs in termini comprensibili da un politico richiedeva un'analogia semplice. David Miller, professore di fisica delle particelle e astronomia allo University College di Londra, era convinto di averne trovata una adatta. A prezzo di qualche piccolo ritocco, Miller contava di poter fornire una spiegazione accessibile ispirandosi a una personalità singolare che aveva dominato la politica inglese fino a poco tempo prima, e di cui lo stesso Waldegrave aveva avuto esperienza diretta: l'ex primo ministro Margaret Thatcher.³

Immaginiamo un cocktail party a cui partecipano diversi funzionari di partito, sparsi uniformemente nella sala, ciascuno intento a conversare con chi gli sta accanto. Entra Margaret Thatcher e attraversa la stanza. Tutti coloro che si trovano nelle vicinanze ne sono attratti e le si affollano attorno. Via via che si sposta, il famoso ex primo ministro attrae le persone a cui si avvicina, mentre quelle che ha lasciato dietro a sé si allontanano e tornano a sparpagliarsi. A causa del gruppo di persone che ha intorno in ogni momento, l'ex primo ministro acquista una massa

più elevata del normale, perché a parità di velocità ha maggiore quantità di moto: una volta in moto è più difficile da fermare, e una volta fermato è più difficile da rimettere in moto, perché riparte il fenomeno dell'affollamento attorno a lui. Trasferito in tre dimensioni, e con le complicazioni della relatività, questo è il meccanismo di Higgs.

Per dare massa alle particelle è stato inventato un campo di fondo che si distorce localmente quando è attraversato da una particella in moto. Questa distorsione – l'affollarsi del campo attorno alla particella – genera la massa della particella stessa. L'idea viene direttamente dalla fisica dello stato solido. Invece di un campo distribuito in tutto lo spazio, un solido contiene un reticolo cristallino di atomi carichi positivamente. Quando il solido è attraversato da un elettrone, gli atomi del reticolo ne sono attratti, e questo aumenta la massa efficace dell'elettrone fino a 40 volte rispetto a quella di un elettrone libero.

Il campo di Higgs nel vuoto, di cui si postula l'esistenza, è una sorta di ipotetico cristallo che riempie il nostro universo. Ne abbiamo bisogno perché altrimenti non potremmo spiegare perché le particelle Z e W, che trasportano le interazioni deboli, sono così pesanti, mentre il fotone, che trasporta la forza elettromagnetica, non ha massa.

Così Miller descrive il meccanismo attraverso il quale le particelle elementari prive di massa (rappresentate nell'analogia dalla signora Thatcher) interagiscono con il campo di Higgs (la distribuzione uniforme di funzionari di partito) e acquisiscono così una massa, come mostrato dalla [figura 19](#). Per spiegare invece il bosone di Higgs, Miller scrive:

Consideriamo ora un pettegolezzo che corre attraverso la nostra stanza piena di funzionari di partito sparpagliati uniformemente. Quelli vicino alla porta lo sentono per primi, e si avvicinano gli uni agli altri per coglierne tutti i dettagli, dopodiché si girano verso i loro vicini più prossimi, anch'essi ansiosi di sapere. Si forma così un'onda di addensamento, che attraversa la stanza. Può espandersi fino agli angoli, oppure può limitarsi a formare un gruppetto compatto che trasporta la notizia lungo una linea di funzionari dalla porta fino a qualche dignitario che si trova all'altra estremità della sala. Dato che l'informazione è trasportata dal raggruppamento delle persone, e dato che era proprio questo a dar massa aggiuntiva all'ex primo ministro, allora anche i raggruppamenti da pettegolezzo hanno massa.

Il bosone di Higgs previsto dalla teoria è proprio un raggruppamento di questo genere nel campo di Higgs. Se

riuscissimo a scoprire la particella di Higgs, troveremmo molto più facile credere all'esistenza del campo e al meccanismo che dà massa alle altre particelle. Ancora una volta c'è un'analogia con la fisica dei solidi. Un reticolo cristallino può trasmettere onde di addensamento senza bisogno di essere attraversato da un elettrone che attragga gli atomi. Queste onde si possono comportare come particelle, che vengono chiamate «fononi» e sono anch'esse bosoni. Potrebbe esserci un meccanismo di Higgs, e un campo di Higgs che permea l'universo, senza però che esista un bosone di Higgs. La prossima generazione di acceleratori lo scoprirà.

L'esempio è illustrato in [figura 20](#).



Figura 19 Spiegazione del meccanismo di Higgs secondo l'analogia inventata da Miller. Mentre Margareth Thatcher si fa strada attraverso il «campo» di funzionari di partito, questi si addensano attorno a lei rallentandone il moto. Questo è equivalente ad aver acquisito massa.



Figura 20 Il bosone di Higgs è come un pettegolezzo sussurrato che si propaga attraverso il «campo» di funzionari di partito. Questi si raggruppano per ascoltare la voce, e formano così una «particella» localizzata che si sposta nella stanza.

Waldegrave ricevette 117 proposte di spiegazione, il che la dice di per sé lunga sull'importanza della questione per i fisici. Ne vennero scelte cinque, ma l'esempio di Miller fu giudicato il migliore dalla comunità fisica. Miller ricevette la sua bottiglia di Veuve Clicquot, che

però a quanto pare non riuscì ad assaggiare: «L'hanno bevuto mia moglie, mia cognata e la ragazza di mio figlio» raccontò.⁴

Nonostante le maggiori ristrettezze, il governo britannico ha continuato a onorare i suoi impegni verso il CERN.⁵

Temporaneamente sospesa la caccia al bosone di Higgs, rimanevano poche altre particelle del Modello Standard da trovare. Il 2 marzo 1995 fu annunciata la scoperta del quark top al Fermilab da parte di due gruppi di ricerca in competizione, ciascuno composto da circa quattrocento fisici. Il top era stato identificato tramite i suoi prodotti di decadimento: protoni e antiprotoni di alta energia collidono e producono una coppia top-antitop; ciascuna di queste particelle decade in un quark b (bottom) e in un W. Uno dei due W decade in un muone e in un antineutrino muonico, l'altro in un quark u e un [anti] quark d. Il risultato finale è una collisione che produce un muone, un antineutrino e quattro getti adronici. Il quark top risultò avere una massa di 175 GeV, quasi quaranta volte maggiore di quella del suo partner nella terza generazione, il quark b.

A parte il bosone di Higgs, l'unica particella che mancava all'appello era il neutrino tau, che venne scoperto al Fermilab cinque anni dopo, il 20 luglio 2000. Ora era possibile tracciare per intero lo schema delle interazioni deboli che cambiano il sapore dei quark, illustrato in [figura 21](#).

C'era ancora qualche speranza che il Tevatron o il LEP scoprissero il bosone di Higgs, e per questo le due macchine vennero spinte ai loro limiti. Il problema era che la massa del bosone di Higgs non si poteva predire con precisione. Diversamente dal caso del W e della Z, i fisici non sapevano dove cercare.

C'era tuttavia un diffuso consenso nell'aspettarsi che la massa fosse compresa tra i 100 e i 250 GeV. Sarebbe stato rivelato attraverso i suoi canali di decadimento che, si prevedeva, avrebbero visto la produzione di coppie bottomantibottom associate ad altri quark top o bottom, due fotoni di alta energia, coppie di Z che sarebbero a loro volta decadute in quattro leptoni (elettroni, muoni e neutrini), coppie di W e coppie di leptoni tau.

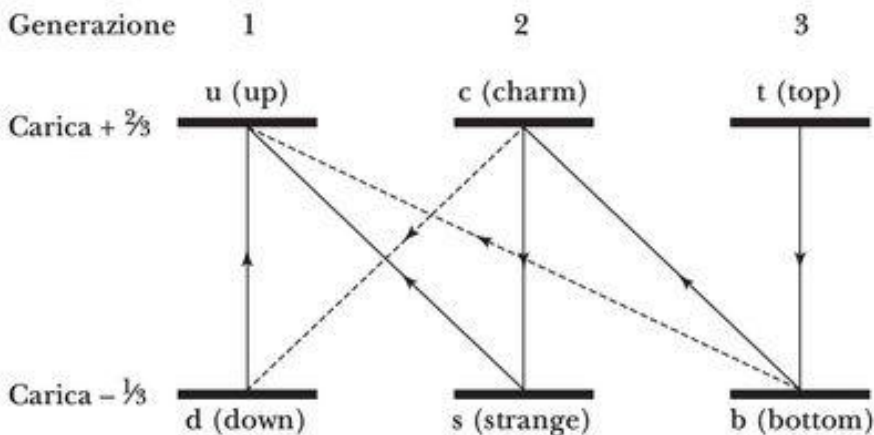


Figura 21 I decadimenti deboli dominanti tra quelli che «cambiano il sapore» sono $d \rightarrow u$, $s \rightarrow u$, $c \rightarrow s$, $b \rightarrow c$ e $t \rightarrow b$. Le frecce tratteggiate indicano due decadimenti meno probabili: $c \rightarrow d$ e $b \rightarrow u$. Le transizioni verso l'alto comportano l'emissione di un W^- , che decade per esempio in un elettrone e nel corrispondente antineutrino. Le transizioni verso il basso comportano l'emissione di un W^+ , che decade per esempio in un positrone e nel corrispondente neutrino.

Il LEP si era dimostrato una macchina potente e versatile, ma era arrivato al termine della sua vita utile e avrebbe dovuto essere dismesso nel settembre 2000. In un ultimo disperato tentativo di trovare il bosone di Higgs, al CERN spinsero la macchina ben oltre i suoi limiti. I suoi fasci avevano raggiunto l'energia di progetto di 45 GeV (dunque un'energia di 90 GeV per le collisioni elettrone-positrone) nell'agosto 1989. Diversi ammodernamenti avevano alzato l'energia di collisione oltre i 170 GeV, aprendo la possibilità di produrre coppie di W. Nell'estate del 2000 l'energia era stata portata oltre i 200 GeV.

Il 15 giugno 2000 il fisico del CERN Nikos Konstantinidis esaminò un evento registrato il giorno prima dal rivelatore ALEPH.⁶ L'evento conteneva quattro getti adronici, due dei quali provenienti dal decadimento di una Z. Gli altri due sembravano provenire dal decadimento di una particella più pesante, con massa intorno ai 114 GeV.

Le sembianze erano in tutto e per tutto quelle del bosone di Higgs.

Un singolo evento naturalmente non costituiva una scoperta, ma fu ben presto seguito da altri due eventi registrati da ALEPH, e altri due osservati da DELPHI, una collaborazione «rivale». Non era ancora sufficiente per dichiarare la scoperta, ma abbastanza per convincere il direttore generale del CERN, Luciano Maiani, a ritardare la chiusura del LEP fino al 2 novembre. Quando un terzo rivelatore, chiamato L3, registrò un evento di tipo diverso, apparentemente causato dal decadimento di un Higgs in due getti adronici affiancato da quello di una Z in due neutrini, al CERN sembrò di essere alla vigilia di una delle scoperte più importanti nella fisica delle alte energie dall'invenzione

del bosone di Higgs nel 1964.

I fisici del CERN a questo punto chiesero di mantenere in vita il LEP per altri sei mesi. Maiani sembrava propenso ad accettare la richiesta ma, dopo molte discussioni approfondite in una serie di riunioni con diversi scienziati autorevoli, concluse che le prove erano insufficienti per giustificare un potenziale ritardo nella costruzione dell'LHC. Non potevano esserci passaggi graduali tra LEP e LHC, nessuna transizione indolore diluita nel tempo. Per costruire l'LHC la galleria che ospitava il LEP doveva essere completamente sventrata. Maiani sentì che non aveva altra scelta che chiudere il BEHGGK. La comunità del CERN apprese la decisione da un comunicato stampa.

Molti fisici erano convinti di essere a un passo da una scoperta fondamentale, e il modo in cui Maiani aveva gestito la vicenda aveva lasciato un po' di amaro in bocca. Tuttavia, quando gli eventi in questione furono sottoposti a un esame più attento, la probabilità che fossero davvero segnali inequivocabili di un bosone di Higgs si ridusse ulteriormente. «Capisco la frustrazione e la tristezza di chi pensa di aver avuto il bosone di Higgs a portata di mano» scrisse Maiani nel febbraio 2001 «e teme che possano trascorrere anni prima di veder confermato il proprio lavoro».⁷

La conclusione fu che il bosone di Higgs doveva sicuramente pesare più di 114,4, con un valore probabile della massa attorno ai 115,6 GeV.

Con la scoperta del quark top e del neutrino tau, l'insieme di particelle che costituiscono il Modello Standard era praticamente completo. I fisici si trovavano ora a fronteggiare una situazione mai verificatasi prima: l'assenza di dati sperimentali che deviassero dalle predizioni teoriche. Ciò nondimeno, rimaneva molto lavoro per i teorici.

Le gravi pecche del Modello Standard erano state spiacevolmente evidenti fin dall'inizio. Il modello contiene un numero piuttosto allarmante di particelle «fondamentali» o «elementari», tenute insieme in uno schema che richiede venti parametri che non sono deducibili dalla teoria e che quindi devono essere misurati. Di questi venti parametri, dodici servono per specificare le masse dei quark e dei leptoni, e tre per specificare le intensità delle interazioni che li legano.

Poi c'è il problema della massa del bosone di Higgs. Questa massa nasce dalle cosiddette «correzioni a loop» che tengono conto delle interazioni del bosone con particelle virtuali. Le correzioni a loop che coinvolgono particelle pesanti, come un quark top virtuale, danno al bosone di Higgs una massa molto maggiore di quella che può permettersi se deve rompere la simmetria elettrodebole nel modo

richiesto dalla teoria. Il risultato è che la forza debole è prevista molto più debole di quanto non sia in realtà. Questo è noto come «problema della gerarchia».

Inoltre, nonostante il successo di Glashow, Weinberg e Salam nel combinare le forze deboli ed elettromagnetiche, la struttura $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ di teorie di Yang e Mills che costituisce il Modello Standard è lungi dall'essere una teoria completamente unificata delle forze fondamentali.

In mancanza di indicazioni provenienti dall'esperimento, i teorici non avevano altra scelta che farsi guidare dall'estetica, seguendo il proprio istinto alla ricerca di teorie che trascendessero il Modello Standard, spiegando le leggi della natura a un livello ancor più fondamentale.

Oltre alle teorie di grande unificazione alla Georgi-Glashow, alcuni fisici teorici sovietici avevano esplorato all'inizio degli anni Settanta un altro possibile approccio all'unificazione, scoperto indipendentemente nel 1973 dai teorici del CERN Julius Wess e Bruno Zumino. È la cosiddetta «supersimmetria», spesso abbreviata nell'acronimo *SUSY*. Le teorie supersimmetriche sono molte, ma una delle più semplici, proposta per la prima volta nel 1981 e chiamata Modello Standard Supersimmetrico Minimale (*MSSM*), prevede l'esistenza di «super-multipletti» che collegano particelle di materia (fermioni) ai bosoni mediatori di forza.

Nelle teorie supersimmetriche le equazioni sono invarianti per lo scambio di fermioni e bosoni. Le grandi differenze nelle proprietà e nel comportamento di fermioni e bosoni nella fisica che osserviamo oggi indicano che questa simmetria deve essere stata rotta, o nascosta.

Una conseguenza della supersimmetria è la proliferazione di nuove particelle. Per ogni fermione, la teoria prevede un corrispondente supersimmetrico (detto *sfermione*) che è in realtà un bosone. Questo significa che per ogni particella del Modello Standard, la teoria richiede un corrispettivo supersimmetrico, dotato di massa e il cui numero quantico di spin differisce di $1/2$ da quello della particella standard. Il corrispettivo dell'elettrone è chiamato *seletrone* (dove la «s» è un'abbreviazione di «scalare»). A ciascun quark è associato uno squark.

Analogamente, a ogni bosone del Modello Standard è associato un partner supersimmetrico (detto *bosino*) che è in realtà un fermione. I partner supersimmetrici del fotone, del W e della Z sono chiamati *foto*, *wino* e *zino*.

Uno dei vantaggi del *MSSM* è che risolve il problema della massa del bosone di Higgs. In questo modello, infatti, le correzioni a *loop* che tenderebbero a gonfiare la massa dell'Higgs sono cancellate dalle correzioni di segno opposto dovute alle interazioni con particelle

virtuali supersimmetriche. Il contributo alla massa dell'Higgs dovuto all'interazione con un quark top virtuale, per esempio, è cancellato da quello dovuto alle interazioni con il corrispettivo squark top (o *stop*). Questa cancellazione rende stabile la massa dell'Higgs e di conseguenza l'intensità della forza debole. Affinché questo meccanismo funzioni, il $MSSM$ necessita di cinque particelle di Higgs, ciascuna con una sua massa. Tre di queste sono neutre, le altre due hanno invece carica elettrica.

Il Modello Supersimmetrico Minimale spiana anche un'altra grinja del Modello Standard. Come avevano dimostrato Weinberg, Georgi e Quinn nel 1974, le intensità delle interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche diventano quasi uguali a energie molto elevate. Quasi, ma non esattamente uguali, come invece ci si aspetterebbe in una teoria di campo unificata elettrounificata. Nel Modello Supersimmetrico Minimale, invece, le intensità delle tre forze convergono a un valore unico (fig. 22).

La supersimmetria potrebbe anche risolvere un problema che affligge da lungo tempo la cosmologia. Nel 1934 l'astronomo svizzero Fritz Zwicky scoprì che la massa media delle galassie nell'Ammasso della Chioma, dedotta da effetti gravitazionali, è incompatibile con la massa dedotta dalla luminosità delle galassie stesse nel cielo notturno. Ben il 90 per cento della massa necessaria a spiegare gli effetti gravitazionali mancava all'appello, o era invisibile, e fu pertanto chiamata «massa oscura».

Il problema non era limitato a un unico ammasso di galassie. La materia oscura è un componente centrale dell'attuale Modello Standard della cosmologia del big bang, il modello Λ -CDM. Una serie di osservazioni della radiazione cosmica di fondo da parte del satellite COBE e, più recentemente, del WMAP indicano che la materia oscura costituisce circa il 22 per cento della massa-energia dell'universo. Circa il 73 per cento è «energia oscura», associata a un onnipervasivo campo di energia del vuoto, il che lascia alla massa «visibile» dell'universo (stelle, neutrini, elementi pesanti – tutto ciò che siamo e che possiamo vedere) meno del 5 per cento.

La supersimmetria prevede l'esistenza di superparticelle che non sono soggette né alle forze forti né a quelle elettromagnetiche. Superparticelle come i neutralini sono dunque candidate a essere le cosiddette «particelle massive debolmente interagenti» (WIMP), che si pensa costituiscano una porzione significativa della materia oscura.⁸

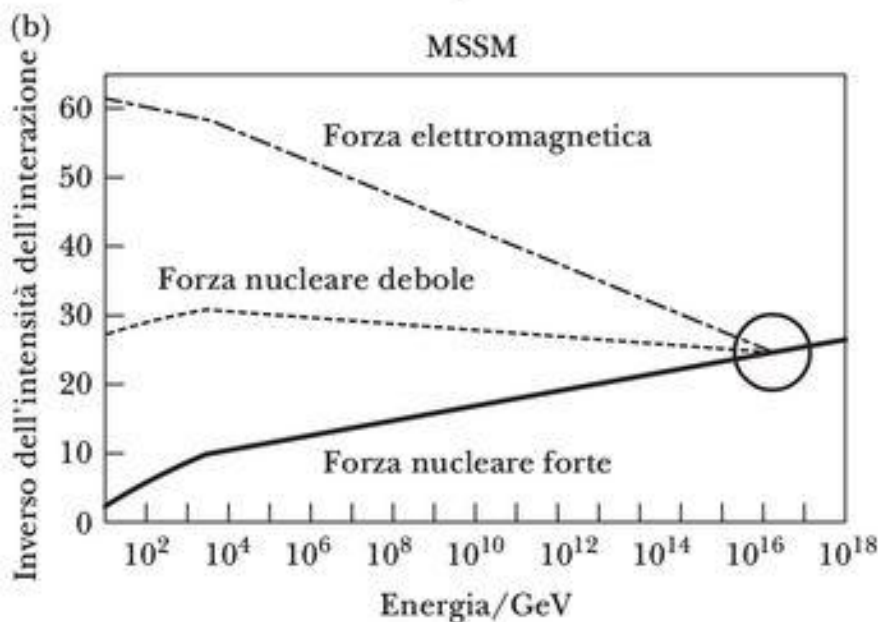
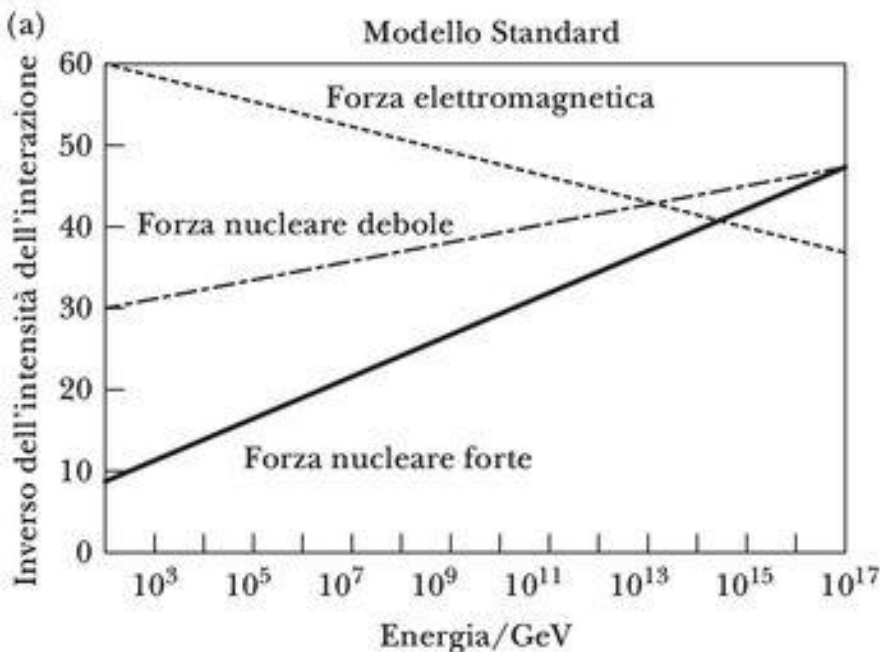


Figura 22 a) L'extrapolazione delle intensità delle forze nel Modello Standard individua un'energia (e un corrispondente istante successivo al big bang) in cui le forze hanno la stessa intensità e sono unificate. Le tre forze non convergono tuttavia in un unico punto. b) Nel Modello Supersimmetrico Minimale (MSSM) i campi quantistici aggiuntivi cambiano l'extrapolazione, e le tre forze convergono molto meglio.

L'esistenza di un esercito di particelle supersimmetriche può sembrare bizzarra, ma la storia della fisica delle particelle è costellata

di scoperte bizzarre basate su previsioni teoriche che al momento della loro formulazione erano state liquidate da molti come assurde. Se davvero esistono, ci si aspetta che alcune delle particelle supersimmetriche facciano capolino a scale di energia dell'ordine del TeV.

All'inizio del millennio, mentre a 150 metri di profondità sotto il suolo franco-svizzero l' LHC cominciava a prendere forma, era a tutti ovvio che il suo scopo andava ben oltre la ricerca del bosone di Higgs elettrodebole, o anche dei diversi bosoni di Higgs e delle particelle supersimmetriche predette dal modello $MSSM$. Si trattava di spingersi oltre il Modello Standard, di capire di che cosa è fatto ciò che ci circonda, e di come tutto questo abbia dato forma al nostro universo.

Nel dicembre 2000 iniziarono i lavori di smantellamento del LEP . Occorreva rimuovere 40 000 tonnellate di materiale. A novembre del 2001 il tunnel era stato completamente svuotato, e i periti iniziarono a marcare i primi dei settemila punti di posizionamento previsti per i vari componenti dell' LHC .

Ci furono ritardi, inevitabilmente. Nell'ottobre 2001 Maiani identificò un significativo sfioramento nei costi, e i conseguenti tagli al bilancio causarono un ulteriore ritardo alla data prevista per la fine dei lavori, che venne spostata dal 2006 al 2007. Come avevano già constatato gli americani con il loro progetto abortito dell' SSC , la nuova tecnologia dei magneti superconduttori tendeva a consumare più fondi del previsto.

La costruzione del sistema di refrigerazione più grande del mondo, in grado di portare i magneti superconduttori a $-271,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, fu completata nell'ottobre 2006. L'ultimo dei 1746 magneti superconduttori fu installato nel maggio 2007.

Anche se l' LHC sarebbe stato alloggiato nel tunnel di 27 chilometri che aveva ospitato il LEP , furono necessari altri scavi per far posto ai nuovi apparati sperimentali. Nel progetto originale ne erano previsti quattro: $ATLAS$ (A Toroidal Lhc Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), $ALICE$ (A Large Ion Collider Experiment), progettato per studiare le collisioni di ioni pesanti (nuclei di piombo), e $LHCb$, consacrato allo studio della fisica del quark b .

In seguito vennero aggiunti altri due apparati, di dimensioni molto inferiori: $TOTEM$ (TOTal Elastic and diffractive cross-section Measurement), progettato per fare misure di altissima precisione sui protoni e installato nelle vicinanze dello stesso punto di collisione tra fasci sfruttato dal rivelatore CMS ; e il rivelatore $LHCf$, allo scopo di studiare le particelle generate nella regione «in avanti» (*forward*) delle collisioni protone-protone, ossia le particelle che emergono in

direzione quasi allineata con i fasci di protoni. LHCf è collocato accanto ad ATLAS, e i due apparati sfruttano lo stesso punto di intersezione dei fasci.

Gli esperimenti ATLAS e CMS sarebbero stati impegnati nella caccia al bosone di Higgs e per eventuale «nuova fisica» che avrebbe potuto segnalare l'esistenza delle particelle supersimmetriche e risolvere il rompicapo della materia oscura. ATLAS consiste in una successione di cilindri coassiali di raggio crescente, disposti attorno al punto in cui si intersecano i fasci di protoni. La funzione del rivelatore più interno è quella di tracciare le particelle cariche, permetterne l'identificazione e misurarne la quantità di moto. Il rivelatore interno è circondato da un grande magnete superconduttore a forma di solenoide (cioè di bobina), usato per curvare la traiettoria delle particelle cariche.

Al suo esterno si trovano i calorimetri elettromagnetico e adronico, i quali assorbono elettroni, fotoni e adroni e ne deducono l'energia sulla base degli sciame di particelle che creano. Uno spettrometro per muoni misura la quantità di moto di queste particelle penetranti, che attraversano indenni tutti gli altri elementi del rivelatore. Per far questo, sfrutta un campo magnetico toroidale (a forma di ciambella) creato da grandi magneti superconduttori disposti in otto «anelli centrali» e due «tappi laterali». Sono i magneti superconduttori più grandi del mondo (fig. 23).

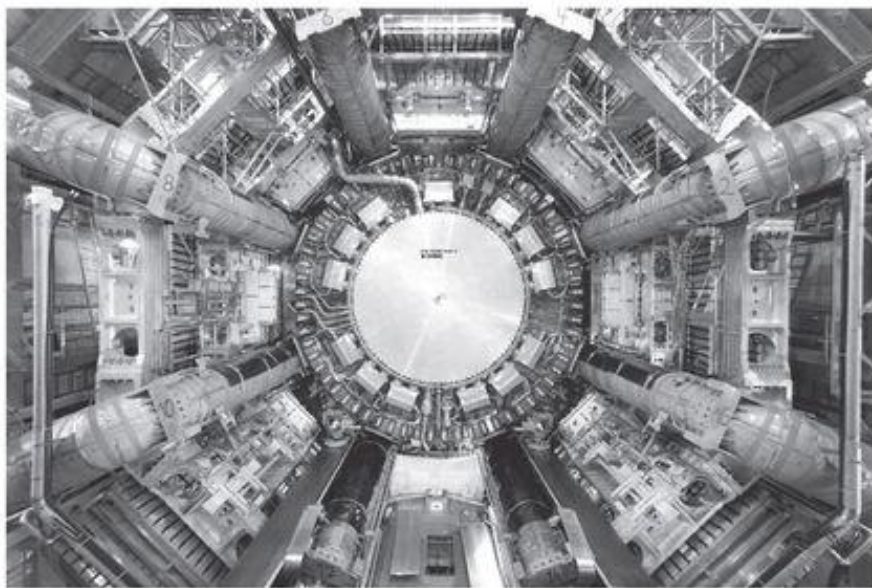


Figura 23 Il rivelatore ATLAS fa uso di un campo magnetico toroidale (a forma di ciambella) creato da grandi magneti superconduttori organizzati in otto anelli centrali e due «tappi». Sono i magneti più grandi esistenti al mondo. Fonte: © CERN.

ATLAS non può rivelare i neutrini, la cui presenza si deve dedurre dallo sbilanciamento della quantità di moto tra le particelle rivelate nei prodotti di una collisione. Per questo il rivelatore deve essere il più possibile «ermetico»: nessuna particella al di fuori dei neutrini deve sfuggire all'identificazione.

Con i suoi 48 metri di lunghezza e 25 di altezza, il rivelatore ATLAS è grande quasi quanto la metà della cattedrale di Notre-Dame a Parigi. Pesa quasi 7000 tonnellate, l'equivalente della Torre Eiffel o di cento Jumbo 747. La collaborazione ATLAS è diretta dall'italiana Fabiola Gianotti e consiste di tremila fisici afferenti a più di centosettantaquattro università e laboratori di trentotto paesi diversi.

CMS ha un disegno diverso ma capacità simili. Il rivelatore centrale è un sistema di tracciatura costituito da rivelatori di silicio a pixel e a strisce che misurano la posizione delle particelle cariche, permettendo di ricostruirne le tracce. Come in ATLAS, un calorimetro elettromagnetico e uno adronico misurano le energie di elettroni, fotoni e adroni. Spettrometri dedicati registrano i dati dei muoni che penetrano oltre i calorimetri.

Il rivelatore CMS è «compatto», nel senso che usa un unico magnete superconduttore solenoidale, ed è quindi più piccolo di ATLAS. Ma è comunque grande: 21 metri di lunghezza, 15 di diametro e 15 di altezza (fig. 24). Secondo il sito ufficiale dell'esperimento, CMS è alloggiato in una caverna sotterranea «e pesa più o meno come 30 Jumbo o 2500 elefanti africani».9 Anche la collaborazione CMS, a capo della quale è stato anche l'italiano Guido Tonelli, comprende tremila fisici e ingegneri, provenienti da centottantatré istituti sparsi in trentotto paesi.

La costruzione dei componenti dei rivelatori ATLAS e CMS, e gli scavi delle caverne che li avrebbero alloggiati, cominciarono nel 1997 e nel 1998. L'assemblaggio dei due apparati fu completato all'inizio del 2008.

Nell'agosto dello stesso anno i 27 chilometri di LHC avevano raggiunto la temperatura di operazione. Il raffreddamento aveva richiesto più di 10000 tonnellate di azoto liquido, e 150 tonnellate di elio liquido per riempire completamente i magneti.

L'LHC era pronto per l'accensione.



Figura 24 Peter Higgs (a sinistra), in visita al rivelatore CMS durante la fase di costruzione, è qui ritratto in compagnia dell'allora capo di CMS Tejinder Virdee. Fonte: © CERN.

«È un momento fantastico» dichiarò il 10 settembre 2008 il capo del progetto LHC Lyndon Evans. «È l'inizio di una nuova era, nella quale sapremo di più sulle origini e l'evoluzione dell'universo». ¹⁰

Purtroppo la gioia di Evans non durò a lungo. L'LHC fu acceso alle 10.28 ora locale. I fisici affollati nella piccola sala di controllo esultarono all'apparizione di un lampo di luce su un monitor, segnale che i protoni avevano compiuto un giro completo attorno all'anello di 27 chilometri mantenuto alla temperatura di 2 gradi sopra lo zero assoluto. Anche se non molto spettacolare (e forse un po' deludente per il miliardo di persone che si stima l'abbiano seguito in televisione), l'evento rappresentava il culmine di due decenni di lavoro assiduo per un esercito di fisici, progettisti, ingegneri e maestranze.

Alle 15 dello stesso giorno un secondo fascio di protoni fu fatto circolare lungo l'anello in verso opposto. I problemi cominciarono di lì a breve. Solo nove giorni dopo, si verificò un corto circuito in una connessione elettrica tra due magneti superconduttori. Si formò una scarica ad arco che perforò il serbatoio dell'elio liquido, con la conseguente fuoriuscita di elio gassoso nel settore 3-4 del tunnel dell'LHC. L'esplosione che ne seguì danneggiò cinquantatré magneti, e contaminò di detriti i tubi destinati ai fasci di protoni.

Non c'era speranza di riparare il danno prima della prevista chiusura invernale, e la ripartenza venne fissata orientativamente per

la primavera del 2009. Ma intervennero nuovi problemi, e al convegno annuale di Chamonix del febbraio 2009 i dirigenti del CERN presero la decisione di mettere in calendario altri lavori.

La ripartenza fu ulteriormente rinviata.

Nel quale l'LHC si comporta meglio di quanto chiunque (eccetto Lyn Evans) si aspettasse, in pochi mesi si raccolgono i dati previsti per un anno, e il bosone di Higgs resta a corto di nascondigli.

Fu solo all'inizio di settembre del 2009, quasi un anno dopo la prima accensione, che l'ultimo degli otto settori dell'LHC poté iniziare la procedura di raffreddamento. Alla fine di ottobre tutti gli otto settori avevano raggiunto la temperatura operativa, e l'LHC ripartì in novembre. Nonostante il maggior costo dell'elettricità durante i mesi invernali, l'acceleratore fu tenuto in funzione durante l'inverno 2009-10, principalmente allo scopo di mantenere il vantaggio del CERN sui rivali del Fermilab che, al Tevatron, avevano intravisto qualche allettante barlume del bosone di Higgs.

Per i primi mesi del 2010 i protoni fatti circolare nell'LHC in direzioni opposte in due diversi anelli vennero accelerati fino a 3,5 TeV, per poi esser fatti scontrare frontalmente. Le prime collisioni a 7 TeV furono registrate il 30 marzo. L'energia di collisione fu quindi mantenuta fissa, mentre gradualmente venivano aumentate l'intensità e la luminosità dei fasci. Sia ATLAS sia CMS registrarono eventi in cui si riconoscevano volti familiari, via via che la moltitudine di particelle del Modello Standard scoperte nel corso di più di sessant'anni si riaffacciava nel giro di pochi mesi. Tra queste il pione neutro, scoperto nel 1950, i mesoni eta, rho e phi (formati da diverse combinazioni di quark u, d e s), i mesoni J/ψ e Y, e i bosoni W e Z (fig. 25). A luglio arrivarono nuovi dati anche sul quark top.

L'8 luglio 2010 il fisico Tommaso Dorigo pubblicò sul suo blog la notizia che, secondo voci di corridoio, al Tevatron erano stati trovati segnali convincenti di un bosone di Higgs leggero. La voce si sparse rapidamente in rete e fu raccolta dai mezzi di informazione. Quasi immediatamente arrivò la smentita dal Fermilab, in un tweet che parlava in tono sprezzante di «voci diffuse da un blogger in cerca di fama». ¹ In seguito Dorigo cercò di giustificarsi sostenendo che «è più importante che i giornali parlino della fisica delle particelle ventilando possibili scoperte che in seguito sfumano, piuttosto che parlare forte e

chiaro una volta ogni dieci anni, in occasione di una scoperta fondamentale confermata, e rimanere in silenzio il resto del tempo». ²

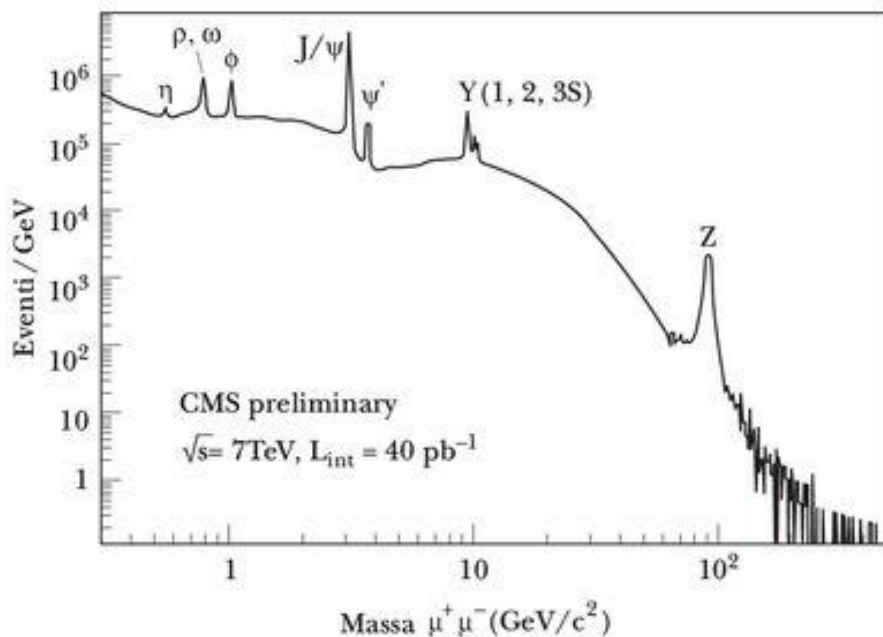


Figura 25 Nei primi mesi di funzionamento dell'LHC a 7 TeV le collaborazioni ATLAS e CMS hanno riprodotto attraverso gli eventi registrati tutto lo spettro noto delle particelle del Modello Standard. Questo grafico prodotto dalla collaborazione CMS mostra le evidenze delle particelle J/ψ , Y (un mesone formato da un quark bottom e dal corrispondente antiquark), e della Z^0 , ottenute analizzando le coppie muone-antimuone di diverse energie. *Fonte:* © CERN per la collaborazione CMS.

Giuste o sbagliate, le voci erano sintomatiche della rivalità crescente tra il Fermilab e il CERN, e della crescente sensazione che la scoperta di *qualcosa* fosse imminente. Lederman aveva ammesso qualche tempo prima che l'annuncio di qualunque futura scoperta da parte del CERN lo avrebbe lasciato con un misto di gioia e amarezza: «Sarebbe un po' come vedere la suocera finire in un burrone a bordo della nostra BMW». ³

Le voci che Dorigo aveva riferito nel suo blog parlavano di un segnale a «3 sigma», una misura statistica che rispecchia il grado di fiducia nei dati sperimentali. ⁴ Un segnale a 3 sigma corrisponde a un livello di fiducia del 99,7 per cento, cioè a una probabilità dello 0,3 per cento che il «segnale» sia in realtà dovuto al caso. Sembrerebbero numeri abbastanza convincenti, tuttavia per dichiarare un'avvenuta «scoperta» i fisici delle particelle richiedono un segnale a 5 sigma, corrispondente a un livello di fiducia del 99,999 per cento.

Le collisioni in grado di produrre un bosone di Higgs sono, secondo le previsioni, estremamente rare; per accumulare un segnale di 5 sigma sarebbe quindi stato necessario registrare un numero enorme di

eventi candidati. Era quindi cruciale la luminosità del fascio di particelle: più questa è alta, maggiore è il numero di collisioni in un dato lasso di tempo, e dunque maggiore il numero di eventi candidati.⁵ La luminosità integrata (ossia sommata nel tempo) risulta in effetti direttamente proporzionale al numero di eventi registrati.

La luminosità integrata è espressa in un'unità di misura piuttosto misteriosa chiamata «barn inverso». I fisici misurano le probabilità delle reazioni nucleari in termini di «sezioni d'urto», espresse in centimetri quadrati. La sezione d'urto può essere pensata come l'area di un'ipotetica «finestra» bidimensionale attraverso la quale avviene la reazione: più larga è la finestra, più probabile è la reazione; più la reazione è probabile, più è veloce. Le sezioni d'urto nucleari hanno tipicamente dimensioni atomiche, dell'ordine di 10^{-24} cm². Le sezioni d'urto delle reazioni che coinvolgevano gli atomi di uranio si rivelarono talmente grandi che un fisico del Progetto Manhattan le definì «grandi come un granaio» (*barn* in inglese). Il «barn» divenne quindi l'unità di misura: una sezione d'urto di 10^{-24} cm² divenne una sezione d'urto di 1 barn. Un picobarn è un millesimo di miliardesimo (10^{-12}) di barn, o 10^{-36} cm²; un femtobarn è un milionesimo di miliardesimo (10^{-15}) di barn, o 10^{-39} cm².

A un convegno del CERN tenuto a Evian l'8 dicembre 2010, Fabiola Gianotti riassunse le prospettive di scoperta del bosone di Higgs e la natura della gara tra LHC e Tevatron. Un semplice calcolo statistico mostrava che anche accumulando una luminosità integrata di 10 femtobarn inversi (10 volte 10^{15} barn inversi, cioè 10^{40} cm⁻²) entro la fine del 2011, il Tevatron non avrebbe potuto far meglio che riferire di un segnale di 3 sigma per un bosone di Higgs compreso in alcuni, limitati intervalli di energia. LHC, data la maggiore potenza, avrebbe potuto in linea di principio produrre un segnale di 3 sigma con luminosità comprese tra 1 e 5 femtobarn inversi, a seconda della massa dell'Higgs.

Il 17 gennaio 2011 il dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti annunciò che non avrebbe finanziato l'estensione del programma Tevatron oltre il 2011. La decisione non segnò la fine della corsa al bosone di Higgs, ma segnò l'inevitabile passaggio di consegne della frontiera della fisica delle alte energie dal Fermilab al CERN.

Il piano originale di operazione dell'LHC comprendeva un periodo di chiusura prolungato durante il 2012, necessario per attuare i miglioramenti atti a ottenere le energie di collisione di progetto di 14 TeV.⁶ Sentendosi a un passo dalla scoperta dell'Higgs, i manager del CERN decisero nel gennaio del 2011 di posticipare lo *shutdown*, e di mantenere l'LHC operativo a un'energia di collisione di 7 TeV per tutto il 2012. Un eventuale aumento dell'energia di collisione a 8 TeV fu considerato troppo rischioso. Sarebbero invece state adottate strategie

per aumentare la luminosità.

«Se la natura ci è benigna e la particella di Higgs ha una massa entro l'intervallo attualmente raggiungibile dall'LHC,» disse il direttore generale Rolf Heuer a proposito della decisione «nel 2011 potremmo raccogliere abbastanza dati per avere qualche indicazione, ma non per dichiarare una scoperta. Continuando per tutto il 2012 avremo dati a sufficienza per trasformare le indicazioni in scoperta».7

La scena era pronta.

La segretaria di Einstein Helen Dukas una volta gli chiese una spiegazione semplice della relatività da utilizzare in risposta alle continue richieste dei giornalisti. Dopo averci riflettuto su, il grande scienziato propose questa: «Un'ora seduti su una panchina al parco con una bella ragazza sembra un minuto, mentre un minuto seduti su una stufa rovente sembra un'ora».8

Tra le migliaia di scienziati appartenenti alle collaborazioni del Fermilab e del CERN, la tensione e l'eccitazione era palpabile. Non si scoprivano nuove particelle da oltre dieci anni, quasi undici erano trascorsi da quando il bosone di Higgs era stato «intravisto» al LEP, e ora la promessa di nuova fisica era disperatamente, insopportabilmente vicina. Quanto? Sei mesi, un anno, due anni? Era decisamente come star seduti su una stufa rovente.

Il crollo della diga era forse inevitabile.

Peter Woit, fisico matematico alla Columbia University, tiene un blog sulla fisica delle alte energie da quando, nel 2006, ha pubblicato il libro di successo *Neanche sbagliata*, una critica della moderna teoria delle stringhe. Il 21 aprile 2011 Woit ricevette un contributo anonimo contenente il sommario di una «nota interna» di ATLAS. L'articolo sosteneva di aver trovato un segnale a 4 sigma di un bosone di Higgs alla massa di 115 GeV.

Non era uno scherzo. L'articolo era stato scritto da un piccolo gruppo di membri di ATLAS dell'Università del Wisconsin. Sau Lan Wu, alla loro guida, aveva fatto parte di ALEPH e del gruppo che aveva intravisto l'Higgs nel 2000, alla fine della vita del LEP. Non era quindi una coincidenza che fosse andata a cercare nell'intervallo di energie dove era convinta di aver visto quei barlumi di segnale.

C'erano due problemi, tuttavia. Il primo di fisica. La particella era stata osservata nella distribuzione della cosiddetta «massa gamma-gamma» ottenuta da un totale di circa 64 picobarn inversi di dati raccolti nel 2010 e all'inizio del 2011.

All'energia di 7 TeV, le collisioni protone-protone che si verificano nell'LHC comportano sia processi di collisione quark-quark sia di cosiddetta «fusione di gluoni», che in teoria possono produrre bosoni

di Higgs. I canali di decadimento aperti all'Higgs dipendono dalla sua massa. Se questa è alta, sono possibili decadimenti in cui si producono due particelle W o due Z ma, per una massa bassa come 115 GeV, l'energia per questi canali non è sufficiente, e il bosone di Higgs decade per vie alternative. Una di queste comporta la produzione di due fotoni di alta energia, un processo indicato simbolicamente con $H \rightarrow \gamma\gamma$.

Il problema stava nel fatto che la risonanza osservata era circa trenta volte più pronunciata di quanto prevedesse il Modello Standard per questo processo.

Il decadimento del bosone di Higgs in due fotoni è dominato nel Modello Standard dai cosiddetti *loop* di W, che comportano la produzione e il successivo decadimento di bosoni W. Di conseguenza, questo canale di decadimento risulta essere molto raro, secondo la teoria, e si osserva solo nello 0,2 per cento dei casi. Se quello osservato era davvero il bosone di Higgs, il suo decadimento in due fotoni era per qualche motivo molto meno raro del previsto; per spiegarlo si sarebbero forse dovute invocare nuove particelle, per esempio quark e leptoni di quarta o quinta generazione.

Il secondo problema riguardava lo status della scoperta. Il documento trapelato era una nota di comunicazione («COM») interna alla collaborazione ATLAS, pensata per consentire la circolazione rapida di risultati non ancora controllati e approvati, da discutere all'interno della collaborazione. In nessun senso lo si poteva interpretare come pubblicazione «ufficiale» del gruppo ATLAS. Successive revisioni e ripetizioni dell'analisi avrebbero potuto annullare completamente il risultato, molto prima della stesura di un articolo ufficiale.

La notizia della nota COM trapelata raggiunse la «blogosfera» poco prima delle vacanze pasquali, e per qualche giorno la discussione rimase limitata all'ambito dei blogger di fisica delle alte energie e dei loro accoliti. Nel 2009 Tommaso Dorigo aveva predetto che il primo a dare la notizia della scoperta del bosone di Higgs sarebbe stato un blog. La sua previsione era stata confermata, ma Dorigo aveva parecchi dubbi che si trattasse davvero dell'Higgs, e scommise 1000 dollari a 500 che ulteriori dati non avrebbero rivelato alcuna nuova particella di 115 GeV nel canale gamma-gamma.

La storia fu raccolta dai principali media inglesi il 24 aprile, giorno di Pasqua. Intervistato da una tv inglese, Jon Butterworth, membro di ATLAS e fisico dello University College a Londra, non si sbilanciò: «Quel che è successo è che un gruppetto di persone ha passato quattro notti insonni; hanno prodotto qualche grafico che li ha entusiasmati parecchio, e l'hanno fatto circolare in una nota interna alla collaborazione. Il che va benissimo. Purtroppo però il documento è trapelato. L'eccitazione in questo momento è alle stelle, da queste

parti».9 Il giorno successivo la storia fu ampiamente riportata dai giornali.

Nel suo blog sul quotidiano «The Guardian», Butterworth tornò sull'argomento: «Mantenere un atteggiamento scientifico distaccato talvolta è difficile. E se non riusciamo a mantenerci lucidi noi per primi, non deve sorprendere che anche all'esterno ci si entusiasmi. È per questo che abbiamo sistemi di scrutinio interno, squadre distinte che lavorano sulla stessa analisi, revisione paritaria esterna, esperimenti di conferma e così via».10

Poco dopo comparvero le voci contrarie. Il 28 aprile un blog francese di fisica delle alte energie scrisse che, con l'aumentare dei dati analizzati, i fisici di ATLAS vedevano scomparire rapidamente il segnale di Higgs. Il 4 maggio il giornalista del «New Scientist» David Shiga pubblicò una notizia in rete, sostenendo di aver visto un documento, trapelato dalla collaborazione CMS, secondo il quale la ricerca nell'intervallo di energia in questione era «risultata vuota».11 Attraverso queste fughe di notizie, gli osservatori interessati potevano scorgere sprazzi del caotico andirivieni che si stava verificando all'interno delle collaborazioni ATLAS e CMS.

L'8 maggio ATLAS pubblicò un aggiornamento ufficiale. L'ulteriore analisi di un totale di 132 picobarn inversi di dati registrati nel 2010 e 2011 era davvero risultata «vuota»: la distribuzione di massa fotone-fotone non mostrava alcun eccesso di eventi. In un messaggio successivo nel suo blog, Butterworth spiegò che questo risultato nullo non era certo sorprendente: lo stesso Modello Standard prevedeva che non ci fosse alcunché da vedere per il momento, ma che ci si potesse aspettare qualcosa «abbastanza presto». «Quindi continuate a seguire con interesse lo spettro di massa gamma-gamma,» scriveva Butterworth «ma attendete risultati robusti prima di stappare lo champagne».12

In realtà non si dovette aspettare troppo. A mezzanotte del 22 aprile LHC raggiunse la luminosità istantanea record di $4,67 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, cioè 467 microbarn (milionesimi di barn) inversi al secondo. Laurette Ponce, di turno quella sera, aveva visitato il CERN da bambina e vi aveva fatto ritorno nel 1999 per i suoi studi di dottorato. «Non avrei mai immaginato, allora, che un giorno sarei stata io a premere il pulsante per il riempimento dell'LHC» dichiara.13

Essendo mezzanotte, nella sala di controllo dell'LHC non c'erano molti testimoni. Laurette si mise a urlare e ballare, agitando le braccia come una ragazzina.

Questo spettacolare aumento di luminosità era stato ottenuto iniettando nei fasci che circolavano nell'LHC un numero sempre crescente di pacchetti di protoni provenienti dall'SPS. Di lì al 3 maggio la luminosità di picco era aumentata ancora, raggiungendo 880

microbarn inversi al secondo e 768 pacchetti per fascio. Verso la fine di maggio si registrò una luminosità di picco di 1260 microbarn inversi al secondo.

Per avere un'idea dei numeri, la sezione d'urto per le collisioni anelastiche protone-protone a 7 TeV vale circa 60 millibarn, cioè 0,06 barn. Una luminosità istantanea di 1260 microbarn inversi al secondo implica quindi $1260 \times 10^6 \times 0,06 =$ *più di 75 milioni di collisioni al secondo*. Se prendiamo 9 picobarn come valore della sezione d'urto di produzione del bosone di Higgs,¹⁴ questa luminosità istantanea implica $1260 \times 10^6 \times 0,06 \times 9 \times 10^{-12} = 0,011$ bosoni di Higgs al secondo, ossia *un bosone di Higgs prodotto in media ogni 90 secondi*.

Lo scalpore seguito alla fuga di notizie aveva spinto molti a chiedersi quale fosse la procedura da seguire per l'annuncio ufficiale di un risultato di grande impatto. James Gillies, capo ufficio stampa del CERN, la illustrò al «New Scientist». Un eventuale risultato di questa portata viene prima discusso e approvato all'interno della collaborazione (ATLAS o CMS) che lo ha prodotto, poi comunicato al direttore generale del CERN. Viene quindi comunicato all'altra collaborazione, così che possa corroborarlo. In seguito vengono informati i capi di altri laboratori, nonché gli Stati membri che contribuiscono al finanziamento del CERN. L'annuncio prende quindi la forma di un seminario organizzato al CERN. A questo punto ne sono a conoscenza già diverse migliaia di persone. Una fuga di notizie appare non solo molto probabile, ma quasi inevitabile.

Dunque, dove si sarebbe verificata la prossima rottura della diga?

Il 17 giugno l'LHC aveva già fornito a ciascuna delle due collaborazioni il femtobarn inverso di dati che era stato fissato come obiettivo per l'intero anno 2011. «Non credo che avessimo messo l'asticella troppo in basso,» spiegò Heuer nella sua relazione di metà anno «penso che siamo stati realistici, ma non ottimisti. E quanto a me, che sono un ottimista nato, devo dire che la macchina ha funzionato meglio di quanto mi aspettassi».¹⁵

Ma per Lyn Evans non era una sorpresa. «L'LHC funziona molto meglio di quanto tutti si aspettavano. Tutti, tranne me» dichiarò. «Sono molto felice».¹⁶ Evans è al CERN dal 1969; fa parte del progetto LHC fin dalla sua nascita, al convegno di Losanna del 1984, e ne è a capo dal 1993. Il suo è stato un viaggio pieno di emozioni.

Con questa luminosità integrata a disposizione di ATLAS e CMS, le aspettative salirono ai massimi storici. I dati erano in quantità sufficiente per fornire un segnale a 3 sigma del bosone di Higgs nell'intervallo di massa 135-475 GeV, o per escluderlo al 95 per cento nell'intervallo tra 120 e 530 GeV. Estrapolando alla fine del 2012, sembrava che la questione si sarebbe definitivamente risolta, in un modo o nell'altro.

«A mio parere, l'amletico dilemma "essere, o non essere" dell'Higgs sarà risolto alla fine del prossimo anno» disse Heuer.¹⁷

Tutta l'attenzione era rivolta alla conferenza della European Physical Society (EPS), il cui inizio era previsto per il 21 luglio.

La conferenza EPS era la prima occasione in cui ATLAS e CMS potevano condividere i risultati ottenuti analizzando più di un femtobarn inverso di dati. Il fatto che entrambe le collaborazioni fossero in grado di presentare i risultati a poche settimane dalla raccolta dei dati testimonia l'impegno profuso da centinaia di fisici che avevano lavorato indefessamente – dormendo ben poco – all'analisi.

Era già evidente che il bosone (o i bosoni) di Higgs, posto che esistesse, non sarebbe stato banalmente «scoperto»: sarebbero stati invece via via eliminati vari intervalli di massa, restringendo la ricerca a regioni sempre più piccole, fino a quando all'Higgs non sarebbe più rimasto spazio per nascondersi.

ATLAS era a questo punto in grado di escludere (con una fiducia del 95 per cento) un bosone di Higgs del Modello Standard nelle regioni di massa comprese tra 155 e 190 GeV, e tra 295 e 450 GeV. Il fatto che non si fosse trovato nulla in una regione di energia così vasta mise in agitazione diversi teorici, specie quelli interessati alla fisica al di là del Modello Standard.

Ma c'era dell'altro. I dati di ATLAS mostravano anche un eccesso di eventi rispetto a quelli di fondo nell'intervallo di massa tra 120 e 145 GeV. Le spiegazioni potevano essere molte, da errori nell'analisi a fluttuazioni negli eventi di fondo non correttamente stimate o previste, o incertezze sistematiche dovute al rivelatore. Oppure poteva trattarsi del primo indizio che qualcosa di simile a un bosone di Higgs del Modello Standard, o forse anche più di un bosone, si annidava in quella regione di massa.

L'eccesso era dominato da eventi attribuibili a due diversi canali di decadimento dell'Higgs. Nel primo, il bosone decade in due W e quindi in due leptoni carichi e due neutrini (in simboli, $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+ \nu \ l^- \bar{\nu}$),¹⁸ nel secondo, molto più raro, l'Higgs decade in due Z_0 e quindi in quattro leptoni carichi ($H \rightarrow Z_0Z_0 \rightarrow l^+ll^+l^-$).¹⁹ Il primo è considerato il canale di decadimento dominante per un bosone di Higgs standard di massa sufficiente, ma naturalmente i neutrini e antineutrini prodotti devono essere «dedotti» non potendo essere rivelati, e questo rende difficile distinguere un eventuale Higgs dagli eventi di fondo. Di conseguenza, gli eventi di questo tipo possono dare indicazioni solo su un intervallo di possibili masse del bosone.

Il secondo canale è molto più pulito, e proprio per questo è soprannominato «canale d'oro»: è infatti quasi completamente privo

della contaminazione di eventi di fondo, ed è così in grado di dare potenzialmente una misura molto precisa della massa dell'Higgs. È anche molto raro, dato che solo un bosone su mille decade in questo modo.

L'eccesso di eventi misurato nei dati di ATLAS era di sole 2,8 deviazioni standard (2,8 sigma) al di sopra del segnale di fondo. Non era ancora un «segnale» di 3 sigma ed era ben lungi dalle 5 sigma necessarie per proclamare la scoperta. Era pur tuttavia un forte indizio. Che cosa aveva trovato CMS?

La collaborazione CMS annunciò di aver escluso, al 95 per cento, la regione tra 149 e 206 GeV, buona parte di quella tra 200 e 300 GeV, e l'intera regione tra 300 e 440 GeV. Anche i dati combinati di CMS mostravano un interessante eccesso di eventi tra 120 e 145 GeV, con una significatività statistica che si era dimostrata difficile da valutare, ma che era lievemente inferiore a quella dichiarata da ATLAS.

La situazione era elettrizzante. ATLAS e CMS, che prima della conferenza avevano lavorato separatamente, segretamente, e in competizione, avevano trovato risultati molto simili.

C'era ancora molta strada da fare. Dopo le presentazioni, alcuni membri di ATLAS e CMS si riunirono per festeggiare con champagne e per discutere i passi successivi. Fu deciso di formare un piccolo gruppo di lavoro per combinare i risultati delle due collaborazioni e ottenere una stima più fondata.

L'LHC aveva continuato a battere i suoi stessi record. Il 30 luglio raggiunse una luminosità di picco di 2030 microbarn inversi al secondo (più di 120 milioni di collisioni protone-protone al secondo). Nonostante alcuni problemi di stabilità, alla data del 7 agosto l'acceleratore aveva fornito ad ATLAS e a CMS una luminosità integrata di più di 2 femtobarn inversi, il doppio della quantità di dati utilizzata per ottenere i risultati mostrati alla conferenza EPS.

I risultati combinati e aggiornati sarebbero stati pronti in tempo per la successiva conferenza estiva importante, il quindicesimo International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energies, il cui inizio era previsto per il 22 agosto al Tata Institute di Mumbai, in India.

A quanto sembrava, la risposta all'amletico dilemma sarebbe arrivata entro pochi mesi.

«Sottile è il Signore, ma non malizioso»²⁰ dichiarò una volta Einstein. Il prossimo capitolo della saga sulla ricerca dell'Higgs non indica certo l'esistenza di una divinità eccessivamente maliziosa; tuttavia, dato il dipanarsi degli eventi, sembrerebbe ragionevole accusare il Signore di possedere una certa propensione al dispetto.

Nelle settimane precedenti la conferenza di Mumbai, sulla blogosfera iniziò a circolare la voce che i dati combinati di ATLAS e CMS ora indicavano in maniera molto *meno* ambigua un bosone di Higgs di massa attorno ai 135 GeV, con una significatività dell'eccesso di eventi osservato molto superiore alle 3 sigma. Le aspettative crescevano. Anche se un segnale a 3 sigma non avrebbe rappresentato una «scoperta», dal grado di sicurezza dei fisici più vicini all'analisi dei dati sarebbe stato possibile capire se erano davvero convinti che questa fosse la volta buona.

Incontrai Peter Higgs un piovoso martedì pomeriggio a Edimburgo, qualche giorno prima dell'inizio della conferenza di Mumbai. Higgs era in pensione dal 1996, ma era rimasto a Edimburgo, vicino al dipartimento universitario dove era diventato lettore di fisica matematica nel 1960. Mi trovai di fronte un pimpante ottantaduenne. Ci sedemmo in un caffè e, assieme al suo amico e collega Alan Walker, parlammo delle sue esperienze e delle sue speranze per il prossimo futuro.

Higgs aveva pubblicato l'articolo che lo avrebbe legato per sempre alla particella che porta il suo nome nel lontano 1964 (anche se essa divenne universalmente nota come «bosone di Higgs» solo nel 1972). Da quarantasette anni attendeva una rivincita di qualche tipo. Parlammo delle prospettive della conferenza di Mumbai, e di quanto fosse fondato l'ottimismo riguardo all'imminenza di un annuncio importante. «È difficile per me oggi ricollegarmi a ciò che ero allora [nel 1964],» mi disse «ma è per me un sollievo che ci si avvicini a una conclusione. Sarebbe bello ricevere, dopo tutto questo tempo, la prova di aver avuto ragione».²¹

La scoperta del bosone di Higgs comporterebbe inevitabilmente un Nobel agli inventori del meccanismo teorico, e infuriavano i dibattiti su chi sarebbe stato scelto dall'Accademia svedese tra Englert, Higgs, Guranlik, Hagen e Kibble.²² Parlammo del grande clamore mediatico che si pensava avrebbe accompagnato un eventuale annuncio indiscutibilmente positivo a Mumbai e le conseguenti dichiarazioni da parte dell'Accademia di Svezia. L'ufficio stampa dell'Università di Edimburgo sarebbe stato fortemente coinvolto. E se le cose fossero finite fuori controllo, Higgs avrebbe semplicemente staccato il telefono e rifiutato di rispondere al campanello di casa.

Per il momento, tuttavia, non ci fu bisogno di questi rimedi estremi. Il lunedì successivo, 22 agosto, mentre prendeva il via la conferenza di Mumbai, James Gillies diramò dal CERN un comunicato stampa. Nessun cenno ai dati combinati di ATLAS e CMS promessi a Grenoble; alla luce dell'ulteriore femtobarn inverso di dati raccolti nell'intervallo tra le due conferenze, l'eccesso osservato da entrambi gli esperimenti nella regione di massa attorno ai 135 GeV era in realtà *diminuito* in

significatività statistica. «Ora, con l'analisi di ulteriori dati, la significatività di quelle fluttuazioni è leggermente diminuita» dichiarava con una certa solennità il comunicato stampa.²³

Difficile trattenere la delusione. Gli indizi che affioravano dai dati presentati a Grenoble erano diventati meno significativi nei risultati presentati a Mumbai. Le prestazioni eccezionali dell'LHC con i suoi due femtobarn inversi prodotti in ciascuno dei due rivelatori entro agosto avevano contribuito ad alimentare la speranza che l'«amletico dilemma» avrebbe trovato risposta più prima che poi. Il Signore aveva chiaramente deciso di fare i dispetti: non sarebbe stato così facile.

Sebbene ciascuno dei due apparati avesse accumulato dati provenienti da 140000 miliardi di collisioni protone-protone, i fisici stavano ancora lottando con una manciata di eventi in eccesso. E la statistica dei piccoli numeri può essere soggetta ad ampie fluttuazioni: piccoli cambiamenti possono causare grandi differenze.

La statistica del lancio di una moneta, per esempio, sembra molto semplice: abbiamo il 50 per cento di probabilità di ottenere testa o croce. Tuttavia, se consideriamo una sequenza di pochi lanci, non dobbiamo sorprenderci se vediamo un eccesso di teste, o di croci. Non possiamo dedurre che la moneta non è «vera»; significa semplicemente che non abbiamo considerato un numero di lanci sufficiente a darci un campione rappresentativo. Raccogliendo più dati, ci aspettiamo che qualunque eccesso poco alla volta scompaia.

Allo stesso modo, dai risultati presentati a Mumbai non si poteva dedurre che il bosone di Higgs non esiste. C'era ancora un eccesso di eventi a masse comprese tra i 115 e i 145 GeV, ma questo era un intervallo di energie che era sempre stato riconosciuto come problematico per l'LHC.

C'era solo una cosa da fare. Bisognava avere ulteriore pazienza in attesa di altri dati. Higgs aveva aspettato quarantasette anni, qualche mese in più non avrebbe certo cambiato le cose. L'LHC continuò a superare le previsioni durante tutta l'estate e parte dell'autunno 2011, raggiungendo una luminosità di picco di 3650 microbarn inversi al secondo. Al termine del ciclo di operazione con protoni, il 31 ottobre dello stesso anno, ciascuna collaborazione aveva accumulato più di 5 femtobarn inversi di dati, corrispondenti a 350000 miliardi di collisioni protone-protone.

Ma in quei giorni tirava un'aria vagamente inquieta. L'esperienza di Mumbai aveva intaccato la fiducia. Da allora non c'erano stati annunci sull'Higgs da parte del CERN, né se ne attendevano a breve. La combinazione dei dati di CMS e ATLAS lungamente attesa fu finalmente pubblicata, ma non diceva nulla di nuovo e si riferiva solo ai due femtobarn inversi disponibili a luglio. La quantità totale di dati era ora più di cinque volte maggiore.

Un brivido di eccitazione fu invece causato dall'annuncio, il 23 settembre 2011, che un gruppo di fisici dell'esperimento OPERA,²⁴ situato sotto il Gran Sasso, stava per rendere pubblici i risultati di misure molto precise della velocità di neutrini generati al CERN, a 730 chilometri di distanza. Stando ai risultati, i neutrini avrebbero percorso il loro tragitto sotterraneo a una velocità lievemente superiore a quella della luce.

Mentre il dibattito sui neutrini superluminali si dipanava, altri fisici del CERN erano impegnati a spiegare come anche la mancata scoperta del bosone di Higgs rappresentasse un importante passo avanti per la fisica delle alte energie. Era certamente vero che la mancata scoperta avrebbe rimandato i teorici alla lavagna. Ma, con tutta la buona volontà del mondo, non trovare nulla non è la stessa cosa che trovare qualcosa.

Date le prospettive piuttosto pessimiste, l'annuncio di una riunione indetta dal consiglio del CERN con i rappresentanti degli Stati membri per discutere gli ultimi sviluppi della ricerca dell'Higgs non suscitò molto interesse. Il primo giorno di riunioni, previsto per il 12 dicembre 2011, sarebbe stato a porte chiuse. Le presentazioni pubbliche da parte di Fabiola Gianotti e Guido Tonelli previste per il giorno dopo sembravano invece un po' più promettenti. In fondo, forse c'era qualcosa da raccontare...

I media di tutto il mondo si riunirono al CERN martedì 13 dicembre. I giornalisti rimasero senza dubbio un po' perplessi dalle presentazioni alquanto asciutte e tecniche a cui assistettero. Tuttavia le conclusioni erano piuttosto convincenti.

Combinando i dati relativi a diversi possibili canali di decadimento del bosone di Higgs, ATLAS aveva osservato un eccesso di eventi corrispondente a 3,6 sigma al di sopra del fondo previsto alla massa di 126 GeV. CMS riferì di un eccesso combinato di eventi con significatività lievemente inferiore (2,4 sigma) per un bosone di Higgs attorno ai 124 GeV.

Ma i fisici invitavano alla prudenza. «L'eccesso può essere dovuto a una fluttuazione,» commentò Fabiola Gianotti «ma potrebbe essere anche qualcosa di più interessante. Non possiamo ancora concludere niente. Abbiamo bisogno di più studi e di più dati. Viste le straordinarie prestazioni dell'LHC quest'anno, non dovremo aspettare a lungo: ci sono ottime speranze di risolvere il mistero nel 2012».²⁵

«Ci sono indizi allettanti in diversi canali in due esperimenti, ma per favore siate prudenti. Non l'abbiamo ancora scoperto. Non l'abbiamo ancora escluso. Ci sentiamo l'anno prossimo» chiosò Heuer.²⁶ In un'intervista alla tv inglese, Jon Butterworth spiegò: «Siamo tutti piuttosto eccitati perché gli indizi sono molto chiari e, come ha detto Rolf Heuer, si sono manifestati in posti diversi contemporaneamente.

Ma dobbiamo tirare il dado ancora un po' di volte».27

Su questa linea rimase anche Higgs: «Che dire, non andrò certo a casa ad aprire una bottiglia di whisky per annegare i dispiaceri, ma nemmeno a stapparne una di champagne!».28

In un intervento pubblicato il giorno stesso sul suo blog, Dorigo dichiarò che i risultati erano «una prova solida» dell'esistenza di un bosone di Higgs del Modello Standard con una massa all'incirca di 125 GeV.29 Seguì una breve ma intensa guerra di parole in rete: il teorico americano Matt Strassler adottò un punto di vista più prudente, sostenendo che l'uso da parte di Dorigo dell'aggettivo «solido» era ingiustificato: «Se avesse detto “qualche segnale preliminare” l'avrebbe fatta franca. Invece mi sembra che abbia passato il limite».30

In realtà, i fisici come comunità invitavano alla prudenza, ma molti individualmente erano disposti a scommettere, come mi spiegò Butterworth: «Dobbiamo davvero prendere altri dati per essere sicuri, ma per quanto mi riguarda ci scommetterei. Dipende da quanto ti piacciono le scommesse».31

Come minimo, c'erano valide ragioni per essere ottimisti. L'LHC avrebbe dovuto riprendere il programma di fisica con protoni nell'aprile 2012, e l'attenzione si rivolse di nuovo alle conferenze estive.

I parametri per il successivo ciclo di operazioni dell'LHC furono decisi nel convegno di Chamonix nel febbraio 2012. Dopo un anno di grandi successi, i tecnici avevano ora molta più fiducia sulle possibilità della macchina, e decisero di spingere l'energia di collisione protone-protone a 8 TeV. La maggiore energia avrebbe aumentato del 30 per cento la probabilità di produrre l'Higgs; anche tenendo conto dell'aumento del fondo, questo avrebbe portato a un aumento della sensibilità del 10-15 per cento. L'obiettivo fu fissato a 15 femtobarn inversi da produrre entro la fine del 2012 alla nuova energia di collisione: una quantità di dati sicuramente sufficiente per mettere fine una buona volta alla ricerca dell'Higgs.

Il 22 febbraio fu rivelato che il risultato di OPERA sui neutrini più veloci della luce era errato. Un cavo a fibre ottiche mal connesso aveva causato un lieve ritardo nelle misurazioni, che si era tradotto in una sottostima del tempo di volo dei neutrini di circa 73 milionesimi di secondo. Una volta corrette, le misure tornarono a essere totalmente compatibili con la velocità della luce.

Da molti punti di vista questa era una conclusione imbarazzante della vicenda, ma i fisici di tutto il mondo tirarono un sospiro di sollievo, confortati nel sapere al sicuro la teoria della relatività speciale. Un paio di membri di alto profilo della collaborazione OPERA

rassegnarono le dimissioni. L'epilogo servì a ricordare (nel caso ce ne fosse stato bisogno) che cosa può succedere quando un esperimento di fisica complesso fa annunci pubblici clamorosi che poi si rivelano errati.

L'LHC fu riavviato il 12 marzo; diciotto giorni più tardi fu raggiunta l'energia di collisione di 8 TeV. Le collisioni protone-protone utili per la fisica cominciarono a metà aprile, con una luminosità istantanea che raggiunse il picco di 6760 microbarn inversi al secondo. Sebbene la presa dati fosse stata leggermente rallentata da problemi tecnici legati alla criogenia, alla fine di maggio l'LHC stava producendo un femtobarn inverso *alla settimana* per esperimento.

A questo punto crescevano le aspettative di un annuncio alla trentaseiesima conferenza internazionale di fisica delle alte energie (ICHEP), che avrebbe avuto inizio il 4 luglio a Melbourne, in Australia. Il 10 giugno, data fissata come limite oltre il quale non sarebbe stato possibile analizzare nuovi dati in tempo per la conferenza, l'LHC aveva fornito a CMS e ATLAS circa 5 femtobarn inversi, una quantità di dati pari a quella raccolta nel corso di tutto il 2011.

Inevitabilmente sui blog di fisica delle alte energie cominciarono a circolare voci. Peter Woit riferì che erano state viste di nuovo forti indicazioni del bosone di Higgs e che i dati del 2011, uniti a metà di quelli disponibili nel 2012, mostravano un eccesso di eventi con significatività di 4 sigma nel canale $H \rightarrow \gamma\gamma$. Le congetture si intensificavano. Tutto lasciava pensare che sia ATLAS sia CMS avrebbero riferito di un eccesso di poco inferiore alle 5 sigma necessarie per dichiarare la scoperta. In questo caso ci sarebbero stati pochi dubbi che, combinando i risultati dei due esperimenti, la conclusione sarebbe stata a favore dell'esistenza dell'Higgs o di qualcosa di simile. Ma le due collaborazioni avrebbero fatto questo passo? In caso negativo, la questione sarebbe rimasta ufficialmente irrisolta fino all'arrivo di nuovi dati. I blogger sarebbero stati liberi di pubblicare le loro ragionevoli ma pur sempre ufficiose combinazioni di dati, e avrebbero potuto trovarsi ad annunciare una «scoperta» che non poteva essere ufficializzata. Era una situazione senza precedenti nella storia della scienza.

Ed ecco che, con una mossa a sorpresa, il CERN annunciò che avrebbe tenuto un seminario speciale nella propria sede di Ginevra il 4 luglio, come «apertura» della conferenza ICHEP. Il seminario avrebbe fornito aggiornamenti sulla ricerca del bosone di Higgs da parte di ATLAS e CMS, e sarebbe stato seguito da una conferenza stampa. Higgs, Englert, Guralnik, Hagen e Kibble erano invitati a presenziare.³²

Era un segno certo che una o entrambe le collaborazioni avevano raggiunto la significatività di 5 sigma richieste per annunciare la scoperta? Le speculazioni si intensificarono ulteriormente. Per non

rimanere indietro, i fisici del Fermilab ricordarono che anche i due esperimenti del Tevatron, D0 e CDF, avevano accumulato quasi 10 femtobarn inversi di dati a una energia di collisione inferiore. Alla conferenza di Moriond, tenuta in marzo in Val d'Aosta, i fisici del Fermilab avevano riportato risultati che indicavano un eccesso di 2,2 sigma nell'intervallo 115-135 GeV, con particolare enfasi sul decadimento in due quark bottom, un canale difficile da osservare all'LHC a causa dell'elevato fondo. In un seminario successivo tenutosi il 2 luglio, due giorni prima dell'annuncio del CERN, il Fermilab dichiarò che alcuni miglioramenti nell'analisi avevano portato la significatività a 2,9 sigma. Naturalmente questo non bastava per dichiarare la scoperta, ma avrebbe certamente corroborato con forza l'imminente annuncio.

Il 4 luglio assistetti al seminario comodamente seduto nel mio ufficio grazie alla diretta trasmessa dal CERN sulla rete, seguendo le reazioni del pubblico attraverso gli interventi in tempo reale pubblicati sul suo blog da Dorigo, che era presente all'evento.

Heuer dichiarò che la giornata era speciale per più di un motivo. Si trattava, dopotutto, della prima volta che una conferenza internazionale di fisica veniva aperta con un collegamento video da un diverso continente.

Il primo a parlare fu Joe Incandela, professore di fisica all'Università della California e capo della collaborazione CMS. Sembrava agitato, quasi fosse consapevole dell'importanza storica del palcoscenico di cui era in quel momento al centro. Ma a poco a poco l'agitazione scemò.

Comprensibilmente, la presentazione diede molta importanza all'incredibile complessità di questi esperimenti. Limitarsi a riassumerne gli esiti in termini di un unico risultato – la risposta all'amletico dubbio – non avrebbe rispettato il lavoro di tutti coloro che avevano contribuito facendo funzionare l'acceleratore e i vari rivelatori, mettendo a punto i sistemi di filtro degli eventi, tenendo a bada la sovrapposizione delle collisioni negli eventi registrati (*pile-up*), calcolando i processi fisici di fondo, gestendo il complesso sistema di calcolo distribuito a livello mondiale (GRID) usato per il trattamento dei dati, svolgendo le analisi degli eventi in dettaglio – e dormendo ben poco. Incandela dedicò una buona parte del tempo a questi aspetti tecnici, come a voler dissipare ogni dubbio sulla validità dei risultati che stava per rivelare.

Quando finalmente arrivò al punto cruciale, la battuta chiave fu elettrizzante. Combinando i dati delle collisioni a 7 TeV del 2011 con quelli a 8 TeV del 2012 si era osservato un eccesso di eventi attorno ai 125 GeV nel canale $H \rightarrow \gamma\gamma$ con una significatività di 4,1 sigma. Una

combinazione analoga per il canale $H \rightarrow Z_0 Z_0 \rightarrow l_+ l l_+ l_-$ aveva dato un eccesso di 3,2 sigma. Mettendo assieme i dati dei due canali si otteneva un eccesso di 5,0 sigma. Quello atteso per un bosone di Higgs del Modello Standard era di 4,7 sigma. «È bello essere a cinque» concluse Incandela.³³

L'uditorio scoppiò in un applauso spontaneo.

C'erano altri risultati da riferire, legati ad altri canali di decadimento, che però non cambiavano il quadro generale. I risultati combinati sono mostrati in [figura 26a](#) in termini del cosiddetto *p-value*, una misura della significatività statistica, in funzione della massa dell'Higgs.

A questo punto, sotto l'incalzare del tempo, la parola passò rapidamente alla seconda collaborazione, e Fabiola Gianotti si accinse a presentare i risultati di ATLAS. Anche in questo caso fu data molta enfasi a importanti aspetti tecnici dell'esperimento. Un dato mi colpì in particolare: con un totale di 10,7 femtobarn inversi di dati, l'eccesso a 126 GeV che ci si attendeva nel canale $H \rightarrow \gamma\gamma$ era stimato a soli 170 eventi. Il numero di eventi di fondo alla stessa energia era invece di 6340, con un rapporto segnale-rumore di appena il 3 per cento.

La conclusione di Gianotti era molto simile a quella del suo collega di CMS. Combinando i dati del 2011 e del 2012 si otteneva un eccesso di eventi a 126,5 GeV nel canale $H \rightarrow \gamma\gamma$ con una significatività di 4,5 sigma, cioè più alta (di un fattore due) di quella prevista dal Modello Standard. I dati relativi al canale $H \rightarrow Z_0 Z_0 \rightarrow l_+ l l_+ l_-$ mostravano invece un eccesso di 3,4 sigma. L'eccesso combinato di $H \rightarrow \gamma\gamma$ e $H \rightarrow Z_0 Z_0$ era di 5 sigma, di poco superiore alle 4,6 sigma previste dal Modello Standard. I risultati sono riassunti in [figura 26b](#).

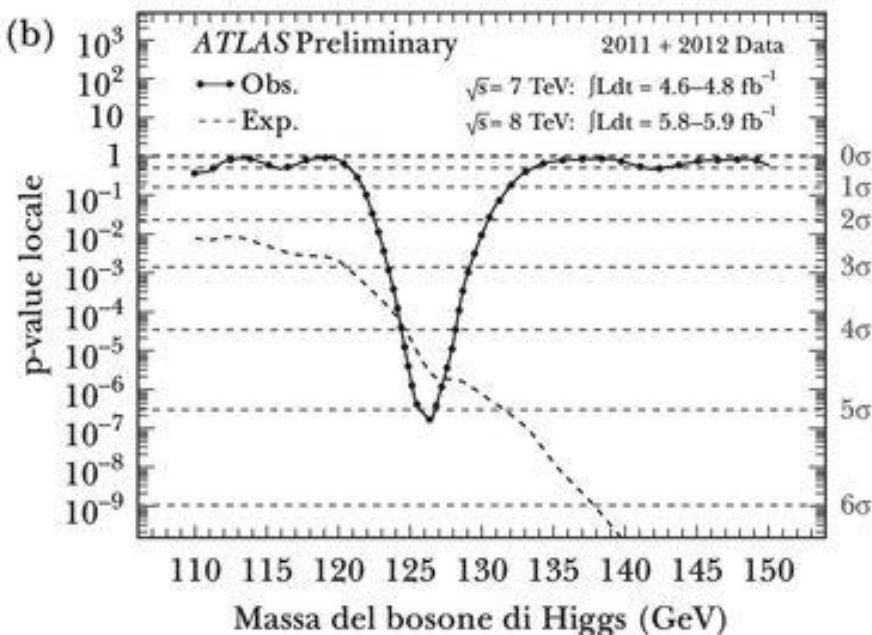
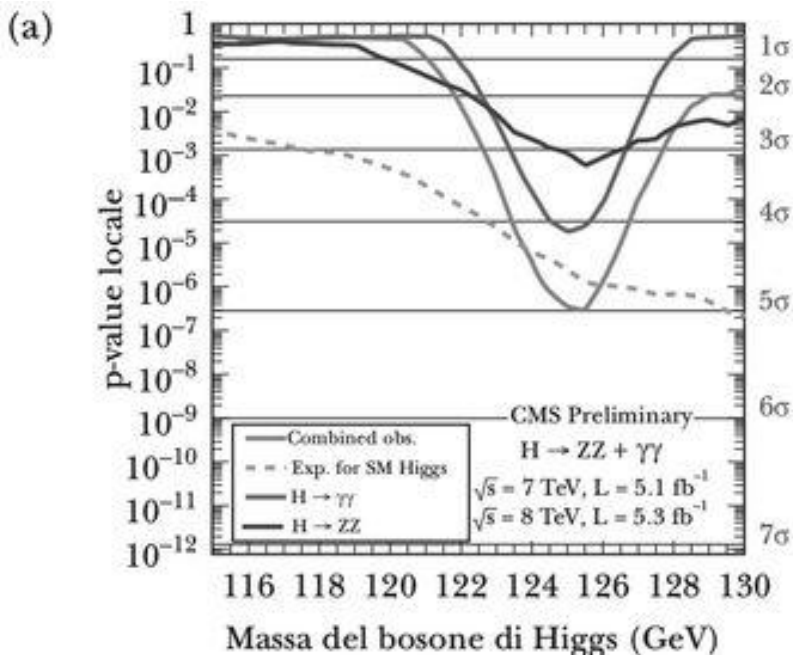


Figura 26a / Figura 26b Risultati preliminari riportati dalle collaborazioni CMS e ATLAS il 4 luglio 2012. I grafici mostrano il cosiddetto $p\text{-value}$ (una misura della significatività statistica) al variare della massa ipotizzata per la particella di Higgs. a) Il risultato di CMS mostra un eccesso di eventi nei canali $H \rightarrow \gamma\gamma$ e $H \rightarrow Z\phi Z\phi \rightarrow l+l+l+l$ e nella combinazione dei due, che raggiunge il fondamentale livello di 5 sigma. La linea tratteggiata mostra l'eccesso predetto dal Modello Standard per ogni possibile massa

Entrambi gli esperimenti avevano dunque trovato le 5 sigma richieste per dichiarare avvenuta la scoperta. Nuovi applausi.

«Da profano direi che ci siamo. Siete d'accordo?» chiosò Heuer.³⁴ Non vi era dubbio che fosse stato scoperto qualcosa che somigliava molto al bosone di Higgs del Modello Standard e, per un profano, la conclusione non poteva essere che «ci siamo». Ma i fisici usano criteri molto più stringenti. Si mostrarono molto cauti sulla natura della scoperta che avevano appena annunciato e, garbatamente pressati dai giornalisti nella conferenza stampa successiva al seminario, si arroccarono sulla conclusione che la nuova particella era *compatibile* con il bosone di Higgs. Si rifiutavano di portare il discorso sulla domanda se fosse davvero *il* bosone di Higgs.

I fatti sono questi: il nuovo bosone ha una massa compresa tra i 125 e i 126 GeV e interagisce con altre particelle del Modello Standard esattamente nel modo che ci si aspetta per il bosone di Higgs. A parte l'eccesso osservato nel canale $H \rightarrow \gamma\gamma$, le modalità di decadimento del nuovo bosone in altre particelle sono compatibili con quanto previsto per il bosone di Higgs del Modello Standard. Sebbene ATLAS e CMS abbiano chiarito che si tratta di un bosone, nessuno dei due esperimenti ha misurato il valore del numero quantico di spin, che potrebbe essere 0 o 2. L'unica particella per cui ci si aspetta spin 2 è però il gravitone, il presunto mediatore della forza gravitazionale. È quindi molto più probabile che il valore dello spin sia 0. Parafrasando Rubbia, potremmo essere tentati di dichiarare, non ingiustificatamente: «Ha l'aspetto di un bosone di Higgs standard, l'odore di un bosone di Higgs standard: deve essere un bosone di Higgs standard».

In verità questi risultati rappresentano una pietra miliare di un nuovo lungo percorso. È stato scoperto un nuovo bosone che ha tutto l'aspetto di un bosone di Higgs. Ma *quale* bosone di Higgs? Al Modello Standard ne serve solo uno, per rompere la simmetria elettrodebole. Il Modello Standard Supersimmetrico ne richiede cinque, altri modelli hanno stime ancora diverse. L'unico modo per sapere che tipo di particella è stata scoperta è esplorarne le proprietà e il comportamento in nuovi esperimenti.

Il comunicato stampa del CERN commentava così:³⁵

L'identificazione certa delle caratteristiche della nuova particella richiederà una quantità considerevole di tempo e di dati. Ma quale che sia la forma assunta dalla particella di Higgs, la nostra conoscenza della struttura fondamentale della materia sta per compiere un grande passo avanti.

Il seminario si concluse con meritate pacche sulle spalle e felicitazioni reciproche. Quando gli fu chiesto un commento, Peter Higgs fece le sue congratulazioni al laboratorio per il notevole successo e aggiunse «È davvero incredibile che sia accaduto mentre sono ancora in vita».³⁶

Un capitolo importante dei nostri sforzi per comprendere la natura della materia sta per concludersi. Un altro, emozionante capitolo si sta per aprire.

EPILOGO

LA COSTRUZIONE DELLA MASSA

Di che cosa è fatto il mondo?

A metà degli anni Trenta avremmo spiegato che tutta la materia del mondo è fatta di elementi chimici, e che ciascun elemento consiste di atomi. Ogni atomo è fatto a sua volta da un nucleo composto di un numero variabile di protoni, di carica positiva e di neutroni, privi di carica elettrica. In orbita attorno al nucleo ci sono gli elettroni, di carica negativa, tenuti legati dalla forza di attrazione elettrica. Lo spin di ogni elettrone può assumere due direzioni («su» e «giù»), e ogni orbitale atomico può ospitare un massimo di due elettroni, a patto che abbiano orientazione di spin opposta. Gli elettroni possono spostarsi da un orbitale all'altro attraverso l'emissione o l'assorbimento di radiazione elettromagnetica sotto forma di fotoni.

Avremmo spiegato che il peso del cubetto di ghiaccio da 18 grammi che teniamo in mano deriva dalla massa totale di 108 centinaia di migliaia di miliardi di miliardi di protoni e neutroni.

Oggi le nostre risposte sono diventate notevolmente più raffinate.

I protoni e i neutroni del nucleo non sono in realtà particelle elementari: sono composte da quark, di carica elettrica frazionaria. Un protone consiste di tre quark di «sapore» diverso: due u e un d. I quark si distinguono anche per il «colore»: rosso, verde o blu. I due quark u e il quark d del protone hanno tutti colore diverso, così che la loro combinazione appaia «bianca». Un neutrone consiste di un quark u e due quark d, anch'essi di tre colori diversi.

La forza di colore tra i quark è trasportata da otto diversi tipi di mediatori di forza, chiamati gluoni. Tale forza cresce in intensità non all'avvicinarsi dei quark, come ci si potrebbe aspettare, ma al loro allontanarsi. La forza nucleare forte tra protoni e neutroni è semplicemente un residuo, un «rimasuglio» della forza di colore tra i quark di cui sono composti.

La scoperta di una nuova particella al CERN è una forte indicazione che la massa dei quark sia dovuta alla loro interazione con il campo di Higgs, che trasforma quark altrimenti privi di massa in particelle massive. L'interazione dà «spessore» alle particelle, rallentandole: questa resistenza all'accelerazione è ciò che chiamiamo massa.

Ma le masse dei quark sono molto piccole, e spiegano solo l'uno per cento della massa del protone o del neutrone. Il restante 99 per cento è dovuto all'energia trasportata dai gluoni privi di massa che vengono

continuamente scambiati dai quark e che li tengono legati assieme.

Nel Modello Standard il concetto di massa come proprietà intrinseca, o misura della quantità di sostanza, non esiste più. La massa proviene esclusivamente dall'energia delle interazioni che si verificano tra i campi quantistici elementari e le loro particelle.

Il bosone di Higgs è parte del meccanismo che spiega come si forma la massa di tutte le particelle dell'universo. Anche se tutta la materia dell'universo fosse fatta di quark e leptoni, dovrebbe la sua stessa sostanza all'energia acquisita grazie all'interazione con il campo di Higgs e allo scambio di gluoni.

Senza queste interazioni, la materia sarebbe effimera e impalpabile come la luce stessa, e nulla sarebbe.

NOTE

PROLOGO. FORMA E SOSTANZA

1

Platone, *Timeo*, 53a-57b. Platone costruisce aria, fuoco e acqua con un tipo di triangolo e la terra con un altro. Ne deduce che non è possibile trasformare la terra in altri elementi.

2

Esistono elementi più pesanti dell'uranio, ma non si trovano in natura. Sono intrinsecamente instabili, e devono perciò essere prodotti artificialmente in laboratorio o in un reattore nucleare. L'esempio più noto è probabilmente il plutonio.

3

La densità del ghiaccio puro a 0 °C è 0,9167 grammi al centimetro cubo. Il cubetto di ghiaccio considerato ha un volume di circa 19,7 centimetri cubi, cosicché la sua massa è di poco superiore ai 18 grammi.

4

Naturalmente dobbiamo far attenzione a non confondere il peso con la massa. Il cubetto di ghiaccio *pesa* 18 grammi sulla Terra ma molto meno sulla Luna, ed è totalmente privo di peso in orbita attorno alla Terra. La sua *massa*, tuttavia, rimane saldamente fissa. Per convenzione, identifichiamo la massa con il peso sulla Terra.

5

Albert Einstein, «Annalen der Physik», 18 (1905), p. 639.

6

In realtà l'equazione $E = mc^2$ non compare in questa forma nell'articolo di Einstein.

7

Fortunatamente per il valore delle riserve auree mondiali, questo non rappresenta un modo economico di trasformare i metalli vili in oro.

1. LA POESIA DELLA LOGICA

1

Auguste Dick, *Emmy Noether. 1882-1935*, Birkhäuser, Boston, 2011 [ed. or. Birkhäuser, Basel, 1970].

2

È il momento di spiegare che cosa si intende qui con «campi». Il campo associato a una forza come la gravità o l'elettromagnetismo ha un'intensità e una direzione in ogni punto dello spazio circostante l'oggetto che lo genera. È possibile rivelare il campo immergendovi un altro corpo soggetto alla forza in questione. Prendiamo un oggetto qualunque (preferibilmente infrangibile) e lasciamolo cadere. La risposta dell'oggetto è governata dall'intensità e dalla direzione del campo gravitazionale nel punto preciso in cui lo lasciamo andare. L'oggetto sente la forza, e cade a terra.

3

Albert Einstein, lettera a Hermann Weyl, 8 aprile 1918, cit. in Pais (1982), p. 341 [trad. it. p. 364].

4

Nel 1905 Einstein le chiamò «quantum di luce». Oggi le chiamiamo fotoni.

5

Louis de Broglie, «Recherches sur la Théorie des Quanta», tesi di dottorato, Università di Parigi (1924), p. 10. Un esempio familiare di onda di fase è la *ola* che si propaga sugli spalti di uno stadio. L'onda è creata dal moto dei singoli spettatori che cambiano posizione, da seduti (la «gola» dell'onda) ad alzati con le braccia in alto (il «picco»). L'onda di fase è il risultato del moto coordinato degli spettatori, e può muoversi sugli spalti molto più velocemente dei singoli spettatori che la creano.

6

La relazione di De Broglie si scrive come $\lambda = h/p$, dove λ è la lunghezza d'onda, h è la costante di Planck e p la quantità di moto.

7

Albert Einstein, «New York Times», 5 maggio 1935.

2. UN PO' DEBOLE, COME SCUSA

1

Julian Schwinger, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 4 marzo 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 127.

2

Richard Feynman, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 22 febbraio 1985. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 139.

3

Freeman Dyson, lettera ai genitori, 18 settembre 1948. Cit. in Schweber (1994).

4

Questi numeri sono soggetti a costanti raffinamenti, sia sperimentali che teorici. I valori citati qui sono presi da Coughlan e Dodd (1991), p. 34.

5

Feynman (1985), p. 7 [trad. it. p. 22].

6

Era una borsa di studio assegnata dagli Stati Uniti con fondi pagati dai cinesi come indennizzo per la rivolta dei Boxer alla fine dell'Ottocento.

7

Le masse delle particelle subatomiche sono tipicamente espresse usando unità di energia, attraverso la formula di Einstein $E = mc^2$. La massa del protone è 938,3 MeV / c^2 , dove MeV significa mega (un milione di) elettronvolt. La massa del neutrone vale 939,6 MeV / c^2 . Il termine c^2 viene spesso omissso (nel senso che è sottinteso), e le masse vengono semplicemente citate come 938,3 e 939,6 MeV, rispettivamente. Un elettronvolt è l'energia che un elettrone acquista se viene accelerato da una differenza di potenziale di un volt.

8

Chen Ning Yang, *Selected Papers with Commentary*, W.H. Freeman, New York, 1983. Cit. da Christine Sutton in Farmelo (2002), p. 241 [trad. it. p. 331].

9

Robert Mills, intervista telefonica a Robert Crease e Charles Mann, 7 aprile 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 193.

10

Frammento di conversazione riferita da Yang il 2 maggio 1985 all'International Symposium on the History of Particle Physics, Batavia, Illinois. Cit. in Riordan (1987), p. 198.

11

Cit. in Enz (2002), p. 481.

12

Chen Ning Yang, *Selected Papers with Commentary*, cit. Cit. da Christine Sutton in Farmelo (2002), p. 243 [trad. it. p. 334].

13

C.N. Yang e R.L. Mills, «Physical Review», 96 (1954), 1, p. 195.

3. NON TI SEGUIRANNO IN MOLTI

1

Emilio Segrè, *Enrico Fermi, Physicist*, University of Chicago Press, Chicago, 1970, p. 72.

2

Per trovare effetti delle interazioni deboli ancor più rilevanti basta dare un'occhiata al Modello Solare Standard, la teoria che attualmente descrive il funzionamento del Sole. La fusione di protoni (nuclei di idrogeno) in nuclei di elio nella parte più interna del Sole comporta la trasformazione di protoni in neutroni attraverso la forza debole, accompagnata dall'emissione di positroni e neutrini.

3

In realtà il furgone non ce la fece nemmeno ad arrivare alla barriera dove si paga il pedaggio, e dovette essere rimorchiato. I fondi stanziati per questi esperimenti erano estremamente limitati, ma i due ebbero la fortuna di incontrare uno dei vicepresidenti della General Motors che stava collaudando un nuovo furgone Chevrolet su strade di montagna, il quale si offrì gentilmente di trainare il furgone degli scienziati e pagò anche la sostituzione del motore.

4

Più precisamente, il rapporto tra la massa a riposo (cioè posseduta dalla particella quando ha velocità nulla) del protone e quella dell'elettrone vale 1836.

5

Isidor Rabi, cit. in Kragh (1999), p. 204.

6

Willis Lamb, in *Nobel Lectures, Physics 1942-1962*, Elsevier, Amsterdam, 1964, p. 286.

7

Fu un periodo di confusione. Come vedremo tra breve, il «mesone mu» non appartiene in realtà alla categoria di particelle in seguito identificate come «mesoni».

8

Cit. in Kragh (1999), p. 321.

9

Un'idea per molti versi simile a quella di «stranezza» fu elaborata all'incirca nello stesso periodo anche dal fisico giapponese Kazuhiko Nishijima (che la chiamò «carica η »). Sebbene sia rimasto in uso il termine «stranezza», la teoria è talvolta chiamata «teoria di Gell-Mann-Nishijima».

10

Murray Gell-Mann e Edward Rosenbaum, «Scientific American», luglio 1957, pp. 72-88.

11

Sheldon Glashow, tesi di PhD alla Harvard University (1958), p. 75. Cit. in Glashow, *Nobel Lectures, Physics 1971-1980*, a cura di Stig Lundqvist, World Scientific, Singapore, 1992, p. 496.

12

La particella neutra fu in origine chiamata B da Glashow, in analogia a Yang e Mills, ma oggi è nota come Z_0 .

13

Murray Gell-Mann, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 3 marzo 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 225.

14

Murray Gell-Mann, Caltech Report CALT-68-124, pp. 22-23. Cit. in Crease e Mann (1986), pp. 264-65.

15

Vale a dire retta visione, retta intenzione, retta parola, retta azione, retta sussistenza, retto sforzo, retta presenza mentale e retta concentrazione.

4. IDEE GIUSTE APPLICATE AL PROBLEMA SBAGLIATO

1

La luce laser è un esempio di questo tipo di condensazione applicata ai fotoni.

2

Nambu (1981), p. 180.

3

Robert Serber, intervista telefonica con Robert Crease e Charles Mann, 4 giugno 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 281.

4

Murray Gell-Mann, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 3 marzo 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 281.

5

Murray Gell-Mann, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 3 marzo 1983. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 282.

6

La formula corretta è un po' più complicata. In generale l'isospin si ottiene facendo la differenza tra il numero di quark u e quello degli antiquark u, sottraendovi la differenza tra il numero di quark d e quello di antiquark d, e dividendo il risultato per due.

7

Di nuovo, la formula generale è più complicata: la stranezza totale è l'opposto della differenza tra numero di quark e numero di antiquark di tipo s.

8

George Zweig, «An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking», CERN Preprint 8419/TH.412, 21 febbraio 1964, p. 42.

9

P.W. Anderson, «Physical Review», 130 (1963), p. 441.

10

Questi tre articoli furono pubblicati nello stesso volume (il 13) della «Physics Review Letters» nel 1964, rispettivamente alle pp. 321-23, 508-509 e 585-87.

11

Diversamente da altri campi quantistici che abbiamo incontrato finora nel libro, quello di Higgs è un campo «scalare»: ha cioè una certa intensità in ciascun punto dello spazio-tempo, ma non una direzione. Non «punta» da nessuna parte, insomma.

12

Si noti che, contrariamente a quanto accade con la melassa nel mondo macroscopico, in questo caso è solo il moto accelerato a essere ostacolato. Le particelle che si muovono a velocità costante non vengono «frenate» dal campo di Higgs. Per questo motivo il campo di Higgs non è in conflitto con la relatività speciale.

13

Peter Higgs, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 508.

14

Peter Higgs, «Physical Review Letters», 13 (1964), p. 509.

15

Peter Higgs, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 510.

16

Steven Weinberg, in *Nobel Lectures, Physics 1971-1980*, cit., p. 548.

17

Steven Weinberg, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 7 maggio 1985. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 245.

5. SO COME FARE

1

Steven Weinberg, citato da John Iliopoulos in un'intervista a Michael Riordan del 4 giugno 1985. Cit. in Riordan (1987), p. 211.

2

Sheldon Glashow, in *Nobel Lectures, Physics 1971-1980*, cit., p. 500.

3

't Hooft (1997), p. 58.

4

Martinus Veltman, comunicazione privata a Andrew Pickering. Cit. in Pickering (1984), p. 178.

5

In particolare contribuendo alla costante cosmologica, introdotta inizialmente da Einstein come «rattoppo» per far tornare le sue equazioni del campo gravitazionale. Nel modello λ -CDM della cosmologia a big bang, la costante cosmologica (λ) controlla il tasso di espansione dello spazio-tempo.

6

Si tratta di un'espressione marinaresca olandese che indica il riordino di una situazione caotica. Veltman in seguito sostenne di aver scelto quel nome per far arrabbiare i non olandesi.

7

Gerard 't Hooft, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 26 settembre 1984. Cit. in Crease e Mann (1986), pp. 325-26.

8

Martinus Veltman, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 173.

9

Sheldon Glashow citato da David Politzer, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 21 febbraio 1985. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 326.

10

Gerard 't Hooft, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 192.

11

Il sito Nobelprize.org riporta freddamente che «Il professor Gell-Mann ha tenuto la sua conferenza di accettazione [in data 11 dicembre 1969], ma non ha inviato alcun manoscritto da includere in questo volume».

12

«Aspen» indica in inglese un tipo di pioppo [*N.d.T.*].

13

Murray Gell-Mann, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 629.

14

Nel loro schema originale Gell-Mann, Fritzsche e Bardeen chiamarono i colori rosso, bianco e blu, ispirandosi alla bandiera francese. Tuttavia fu presto chiaro che rosso, verde e blu avrebbero funzionato meglio dato che, fusi insieme (per esempio nei pixel di uno schermo), danno il colore bianco. Per evitare confusioni ho adottato questa nomenclatura fin dall'inizio.

15

W.A. Bardeen, H. Fritzsche e M. Gell-Mann, *Proceedings of the Topical Meeting on Conformal Invariance in Hadron Physics*, Frascati, maggio 1972. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 328.

16

Murray Gell-Mann, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 631.

1

Le energie delle particelle presenti nei raggi cosmici sono tipicamente tra i 10 MeV e i 10 GeV, ma molto raramente capita anche che si registrino particelle di energia incredibilmente elevata. Il 15 ottobre 1991 nello Utah fu rivelata nei raggi cosmici una particella con un'energia di circa 300 milioni di TeV, subito soprannominata «Oh-My-God particle». Si pensa fosse un protone accelerato a velocità molto vicina a quella della luce.

2

Questi furono descritti, in maniera piuttosto inesatta, come esperimenti che «dividevano l'atomo».

3

La separazione elettromagnetica non era l'unica tecnica usata. A Oak Ridge furono costruiti anche un enorme impianto per la diffusione gassosa (K-25) e uno per la diffusione termica.

4

Il nome fu cambiato in Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) quando fu sciolto il Consiglio provvisorio. Tuttavia l'acronimo OERN fu considerato meno gradevole, e fu dunque mantenuto quello originale.

5

Richard Feynman, intervista a Michael Riordan, 14-15 marzo 1984. Cit. in Riordan (1987), p. 152.

6

Richard Feynman, intervista a Paul Tsai, 3 aprile 1984. Cit. in Riordan (1987), p. 150.

7

Gell-Mann non la prese bene, e li ribattezzò «put-on» cioè «prese in giro» [«pacconi»]. In realtà i «partoni» non sono solo quark: possono essere sia quark sia gluoni (i mediatori della forza di colore tra quark).

8

Richard Feynman, cit. da Jerome Friedman in un'intervista a Michael Riordan del 24 ottobre 1985. Cit. in Riordan (1987), p. 430.

9

Donald Perkins, in Hoddeson *et al.* (1997), p. 430.

10

Il nome è ispirato a quello della madre del gigante Gargantua nei romanzi di François Rabelais.

11

Ribattezzato Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) nel 1974.

12

I fisici del CERN a quest'epoca avevano anche trovato un evento «d'oro» di corrente neutra nelle vecchie fotografie di Gargamelle, che riguardava l'interazione di un antineutrino muonico con un elettrone, un processo molto più raro ma libero da contaminazioni di fondo. Era una prova non ambigua, ma rimaneva pur sempre una sola fotografia. Alla fine, dopo aver passato in rassegna quasi un milione e mezzo di fotografie, furono trovati solo *tre* eventi di quel tipo.

13

Carlo Rubbia, lettera ad André Lagarrigue del 17 luglio 1973. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 352.

14

Il rapporto tra neutrini e antineutrini muonici negli esperimenti NAL era dell'ordine di due a uno. La corrispondente media pesata dei rapporti misurati dal CERN è 0,29.

15

Donald Perkins, «CERN Courier», 1° giugno 2003.

16

David Cline, cit. in Crease e Mann (1986), p. 357.

7. DEVONO ESSERE W

1

Pensiamo all'esperienza, che abbiamo fatto tutti da bambini, di avvicinare i poli nord di due calamite: la resistenza che avvertiamo aumenta quanto più essi sono vicini.

2

A dire il vero 't Hooft era già arrivato alla conclusione che le teorie di gauge alla Yang-Mills potevano esibire questo comportamento anti-intuitivo, ma all'epoca era impegnato con la rinormalizzabilità, e non seguì la faccenda.

3

Gluoni privi di massa? E le affermazioni di Heisenberg e Yukawa, secondo cui i mediatori della forza forte dovevano essere particelle pesanti? Questo sarebbe in effetti obbligatorio se la forza forte fosse simile alla gravità o all'elettromagnetismo, ma le cose non stanno così. La forza di colore a libertà asintotica può essere allegramente trasportata da particelle prive di massa. Come i quark, anche tali particelle sono confinate all'interno degli adroni, ed è per questo che non sono dappertutto come i fotoni.

4

W.A. Bardeen, H. Fritzsch e M. Gell-Mann, *Proceedings of the Topical Meeting on Conformal Invariance in Hadron Physics*, cit. Cit.

in Crease e Mann (1986), p. 328.

5

Analogie di questo tipo sono «colorite» (se mi si passa il gioco di parole), ma rimangono a livello di speculazione. A tutt'oggi quello del confinamento rimane un problema ancora da risolvere nella QCD.

6

I dati sulle masse dei quark sono tratti da C. Amsler *et al.*, «Physics Letters B», 667 (2008), p. 1.

7

Frank Wilczek, *MIT Physics Annual 2003*, p. 35.

8

Se si prende il valore di 938 MeV per la massa del protone, i valori citati corrispondono rispettivamente a 88 e 100 masse protoniche.

9

Pierre Darriulat, in Cashmore *et al.* (2004), p. 57.

10

Simon van der Meer, cit. in B. Soutworth e G. Fraser, «CERN Courier», novembre 1983.

11

Di lui scrive Martinus Veltman: «Quando era direttore del CERN, cambiava segretarie al ritmo di una ogni tre settimane. È meno del tempo medio di sopravvivenza di un marinaio in un sommergibile o in un bombardiere durante la seconda guerra mondiale» (Veltman 2003, p. 74).

12

Wilson aveva incontrato problemi di finanziamento al Fermilab, e se n'era andato frustrato. Come si seppe in seguito, Lederman, dopo aver attentamente vagliato tutte le opzioni nel novembre del 1978, decise che i rischi associati all'uso della macchina esistente come collisore protone-antiprotone erano troppo elevati. A differenza del suo collega Van Hove, non era disposto a scommettere e decise invece di gettarsi anima e corpo in un rinnovato sforzo per la ricerca di finanziamenti per il Tevatron.

13

Pierre Darriulat, in Cashmore *et al.* (2004), p. 57.

14

Carlo Rubbia, cit. in B. Soutworth e G. Fraser, «CERN Courier», novembre 1983.

15

Lederman (1993), p. 357 [trad. it. p. 385].

1

Stime più recenti collocano questa energia attorno ai duecentomila miliardi di GeV.

2

Sebbene «grandi» e «unificate», le GUT non cercano di includere la forza di gravità. Le teorie che lo fanno vengono chiamate spesso Teorie del Tutto (TOE).

3

Howard Georgi e Sheldon Glashow, «Physical Review Letters», 32 (1974), p. 438.

4

Howard Georgi, intervista a Robert Crease e Charles Mann, 29 gennaio 1985. Cit. in Crease e Mann (1986), p. 400.

5

L'acqua allo stato liquido può essere sovraraffreddata fino a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sotto il punto di congelamento.

6

Guth (1998), p. 176.

7

Gli esperimenti cercavano singoli eventi di decadimento in un grande volume di protoni schermato dai raggi cosmici. Come spiega Carlo Rubbia, bastava «prendere mezza dozzina di dottorandi e metterli un paio di miglia sottoterra a guardare per cinque anni una grande piscina piena d'acqua» (Woit 2007, p. 104 [trad. it., p. 99]).

8

Queste minuscole variazioni di temperatura sono state misurate in dettaglio ancor più fine dal satellite $WMAP$ (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). I risultati presentati a febbraio 2003, marzo 2006, febbraio 2008 e gennaio 2010 hanno contribuito a confermare e a raffinare il Modello Standard dell'universo detto λ -CDM (Cold Dark Matter o «materia oscura fredda»), in cui l'inflazione riveste un ruolo determinante. Secondo i dati $WMAP$ più recenti, l'età dell'universo è di $13,75 \pm 0,11$ miliardi di anni.

9

«New York Times», 6 giugno 1983.

10

La citazione integrale recita: «Preferirei essere cenere che polvere! Preferirei che la mia fiamma bruciasse in una vampa brillante piuttosto che venire ricoperto dalla muffa. Preferirei essere un magnifico meteorite, con atomi che bruciano e si infiammano, piuttosto che un pianeta immobile e assopito», cit. in Halpern (2009), p. 151 [la citazione è attribuita a London ma non è documentata nella sua opera. *N.d.T.*].

11

Attribuita (o comunque associata) a Ken Stabler, la citazione fu usata dal giornalista George Will nel titolo di un articolo sul sostegno di Reagan all'«sc apparso in seguito sul «Washington Post».

12

Il breve discorso si può trovare in originale sul sito www.americanrhetoric.com/MovieSpeeches/moviespeechknuterockneallamerican.html.

13

Weinberg (1993), p. 220 [trad. it. p. 283].

14

Lederman (1993), p. 406 [trad. it. p. 438].

15

Raphael Kasper, cit. in «Dallas Morning News», 23 luglio 2005.

16

Herman Wouk, *A Hole in Texas*, Little, Brown & Co., New York, 2004, nota dell'autore.

17

Carlo Rubbia, cit. in Lederman (1993), p. 381 [trad. it. p. 411].

9. UN MOMENTO FANTASTICO

1

William Waldegrave, cit. in Sample (2010), p. 163.

2

A rigor di logica questo non è proprio vero. Esiste una classe di teorie dette «technicolour» che introducono forze extraforti, anch'esse in grado di condurre alla rottura di simmetria. Tali teorie spiegano anche la massa delle particelle W e Z, ma faticano a predire correttamente le masse dei quark. Per questo motivo il meccanismo di Higgs è il favorito (Steven Weinberg, comunicazione privata, 24 febbraio 2011).

3

La proposta di Miller si può trovare al sito www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html. Citato con permesso.

4

David Miller, comunicazione privata, 4 ottobre 2010.

5

Nel 2011 il contributo della Gran Bretagna al bilancio del CERN è stato del 15 per cento: 109 milioni di sterline, cioè meno di due sterline in un anno per cittadino britannico. «Sono letteralmente noccioline» ha sostenuto il fisico di ATLAS e presentatore televisivo Brian Cox. «In effetti gli inglesi spendono più in noccioline che

per l'^{LHC}) («Sunday Times», 27 febbraio 2011).

6

Acronimo di «Apparatus for ^{LEP} pHysics».

7

Luciano Maiani, «^{CERN} Courier», 26 febbraio 2001.

8

I neutralini sono formati da combinazioni di fotino, zino e higgsini neutri. Si veda Kane (2000), p. 158.

9

<http://cms.web.cern.ch/cms/news/why-cms-so-big> [consultato nel maggio 2013].

10

Lyndon Evans, cit. in «^{CERN} Bulletin», 2008, pp. 37-38.

10. L'AMLETICO DILEMMA

1

Fermilab Today su Twitter, cit. da Tom Chivers, «The Telegraph», 13 luglio 2010.

2

Tommaso Dorigo, *Rumours About a Light Higgs*, «A Quantum Diaries Survivor», intervento sul blog dell'8 luglio 2010, www.science20.com/quantum_diaries_survivor.

3

Leon Lederman, cit. da Tom Chivers, «The Telegraph», 13 luglio 2010.

4

Non c'era ovviamente una misura simile per il grado di fiducia nelle voci stesse...

5

La luminosità è una misura del numero di particelle che si riescono a concentrare nel punto di collisione, e dunque del numero di collisioni *potenziali*. Non tutte le particelle collidono: la luminosità esprime la probabilità che si verifichi un certo numero di collisioni.

6

Il periodo di chiusura è stato giudicato necessario per permettere di aprire all'incirca ventisettemila interconnessioni tra i magneti superconduttori principali, ripararle e saldarle di nuovo in modo che fossero in grado di reggere le correnti necessarie a ottenere energie di 7 TeV per fascio.

7

Rolf Heuer, cit. in «^{CERN} Bulletin», 31 gennaio 2011.

8

Albert Einstein, cit. in A. Calaprice (a cura di), *The Ultimate Quotable Einstein*, Princeton University Press, 2011, p. 409.

9

Jon Butterworth, intervista televisiva a Krishnan Guru-Murthy, «Channel 4 News», 24 aprile 2011.

10

Jon Butterworth, *Rumours of the Higgs at ATLAS*, «Life and Physics», pubblicato sul sito del «Guardian» il 24 aprile 2011. www.guardian.co.uk/science/life-and-physics.

11

David Shiga, *Elusive Higgs Slips from Sight Again*, «New Scientist», 4 maggio 2011.

12

Jon Butterworth, *Told You So... Higgs Fails to Materialise*, «Life and Physics», pubblicato sul sito del «Guardian», 11 maggio 2011. www.guardian.co.uk/science/life-and-physics.

13

Laurette Ponce, intervista all'autore, 21 giugno 2011.

14

Il valore si basa sulle raccomandazioni dell'«LHC Higgs Cross Section Working Group» per energie di collisione di 7 TeV. Il valore calcolato della sezione d'urto di produzione di Higgs da fusione gluone-gluone dipende dalla massa dell'Higgs, e varia da circa 18 picobarn a 115 GeV fino a circa 3 picobarn a 250 GeV. In questo intervallo di masse il valore medio è di circa 9 picobarn.

15

Rolf Heuer, *DG's Talk to Staff* («Discorso del direttore generale al personale»), CERN, 4 luglio 2011.

16

Lyndon Evans, intervista all'autore, 22 giugno 2011.

17

Heuer, *DG's Talk to Staff*, cit.

18

I leptoni e i neutrini vengono prodotti a coppie. Un W^- , per esempio, decade in un elettrone o muone e nel corrispondente antineutrino, mentre un W^+ decade in un positrone o in un antimuone, e nel corrispondente neutrino.

19

Anche qui i leptoni sono prodotti a coppie: elettroni con positroni, muoni con antimuoni.

20

La frase «Raffiniert ist der Herr Gott. Aber Boshaft ist Er Nicht» è scolpita nella pietra sopra il camino di una stanza della Fine Hall, all'Università di Princeton, in memoria di Einstein.

21

Peter Higgs, intervista all'autore, 18 agosto 2011.

22

Robert Brout purtroppo è morto nel marzo 2011, dopo lunga malattia. Il premio Nobel non può essere conferito postumo, e può essere condiviso al massimo da tre persone.

23

Comunicato stampa del CERN, 22 agosto 2011.

24

OPERA (acronimo che sta per Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) è una collaborazione tra il CERN e i Laboratori nazionali del Gran Sasso.

25

Fabiola Gianotti, cit. nel comunicato stampa del CERN del 13 dicembre 2011.

26

Rolf Heuer, osservazioni finali, seminario pubblico tenuto al CERN, 13 dicembre 2011.

27

Jon Butterworth, intervista televisiva a Jon Snow, «Channel 4 News», 13 dicembre 2011.

28

Peter Higgs, cit. da Alan Walker, comunicazione privata all'autore, 13 dicembre 2011.

29

Tommaso Dorigo, *Firm Evidence of a Higgs Boson at Last!*, «A Quantum Diaries Survivor», intervento sul blog del 13 dicembre 2011, www.science20.com/quantum_diaries_survivor.

30

Matt Strassler, *Higgs Update Today: Inconclusive, as Expected*, «Of Particular Significance», commento all'intervento sul blog pubblicato il 13 dicembre 2011, profmattstrassler.com/2011/12/13.

31

Jon Butterworth, comunicazione all'autore, 23 dicembre 2011.

32

Kibble aveva altri impegni per quel giorno. Higgs, Englert, Guralnik e Hagen erano invece presenti al seminario.

33

Joe Incandela, in «Latest update in the search for the Higgs boson», seminario CERN, 4 luglio 2012.

34

Rolf Heuer, in «Latest update in the search for the Higgs boson», cit.

35

Comunicato stampa CERN, 4 luglio 2012.

36

Peter Higgs, in «Latest update in the search for the Higgs boson»,
cit.

GLOSSARIO

Adrone Dal greco *hadrós* («forte»). Gli adroni sono le particelle soggette alla forza nucleare forte, dunque composte da varie combinazioni di quark. La classe degli adroni comprende i barioni, composti di tre quark, e i mesoni, composti di un quark e un antiquark.

Antiparticella Identica in massa a una particella «normale», ma di carica opposta. L'antiparticella dell'elettrone (e^-) è il positrone (e^+). L'antiparticella di un quark rosso è un antiquark anti-rosso. Ogni particella del Modello Standard ha un'antiparticella. Alcune particelle neutre, come il fotone, sono antiparticelle di sé stesse.

ATLAS Acronimo per «A Toroidal Lhc ApparatuS». È il nome di una delle due collaborazioni coinvolte nella caccia al bosone di Higgs al Large Hadron Collider del CERN.

Atomo Dal greco *átomos* («indivisibile»). Il termine, originariamente pensato per designare i costituenti ultimi della materia, oggi si riferisce ai costituenti fondamentali di ciascun elemento chimico. L'acqua consiste di molecole H_2O , composte da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno. A loro volta, gli atomi consistono di protoni e neutroni, legati insieme a formare un nucleo centrale, e di elettroni, le cui funzioni d'onda si dispongono attorno al nucleo in forme caratteristiche, dette orbitali.

Barione Dal greco *barýs* («pesante»). I barioni sono una sottoclasse degli adroni. Sono particelle più pesanti soggette alla forza forte, e includono il protone e il neutrone. I barioni sono composti da triplette di quark.

Big bang Termine usato per descrivere l'esplosione cosmica dello spazio-tempo nei primi istanti di vita dell'universo circa 13,7 miliardi di anni fa. In origine Fred Hoyle coniò il termine con intenti dispregiativi, ma oggi le prove schiaccianti di un'origine esplosiva dell'universo sono state ottenute attraverso la rivelazione e la mappatura della radiazione cosmica di fondo, il residuo freddo della radiazione che si presume si sia separata dalla materia circa 380 000 anni dopo il big bang.

Bosone Dal nome del fisico indiano Satyendra Nath Bose. I bosoni sono

caratterizzati da numero quantico di spin intero (0, 1, 2, ...) e non sono soggetti al principio di esclusione di Pauli. Sono bosoni di spin non nullo i mediatori delle forze tra le particelle di materia, come il fotone (elettromagnetismo), il W e la Z (forza debole) e i gluoni (forza di colore). I bosoni di spin 0 non sono invece mediatori di forze; ne sono esempi i pioni, le coppie di Cooper (che però possono avere anche spin 1) e il bosone di Higgs. Si prevede che il gravitone, la particella ipotetica del campo gravitazionale, sia un bosone di spin 2.

Bosone di Higgs Dal nome del fisico inglese Peter Higgs. Tutti i campi di Higgs hanno particelle associate chiamate «bosoni di Higgs». Tuttavia il termine è perlopiù riservato al bosone di Higgs elettrodebole, la particella del campo di Higgs usato per la prima volta nel 1967-68 da Steven Weinberg e Abdus Salam per spiegare la rottura di simmetria elettrodebole. Il 4 luglio 2012 al CERN è stata annunciata la scoperta di qualcosa che somiglia molto al bosone di Higgs elettrodebole: una particella neutra, probabilmente di spin 0 e con una massa di 125 GeV.

Bosone di Nambu-Goldstone Particella priva di massa e di spin 0 che si crea in conseguenza della rottura spontanea di simmetria, scoperta da Yoichiro Nambu nel 1960 ed elaborata da Jeffrey Goldstone nel 1961. Nel meccanismo di Higgs i bosoni di Nambu-Goldstone diventano un «terzo grado di libertà» per le particelle quantistiche che sarebbero altrimenti prive di massa.

Campo di Higgs Dal nome del fisico inglese Peter Higgs. Termine generico usato per qualunque campo di «fondo» aggiunto a una teoria di campo quantistica per innescare la rottura di simmetria attraverso il meccanismo di Higgs. L'esistenza del campo di Higgs usato per rompere la simmetria nella teoria quantistica della forza elettrodebole è fortemente avvalorata dalla scoperta della nuova particella al CERN.

Campo quantistico Nella teoria dei campi classica un «campo di forza» ha un valore in ciascun punto dello spazio-tempo e può essere scalare (intensità senza una direzione) o vettoriale (con intensità e direzione). Le «linee di forza» che compaiono appoggiando su una calamita un foglio cosperso di limatura di ferro danno una rappresentazione di un campo di questo tipo. Nelle teorie dei campi quantistiche le forze sono trasmesse da onde nel campo, che si possono interpretare come particelle, «quanti» del campo stesso. Questa idea può essere estesa dai mediatori di forza (che sono bosoni) anche alle particelle di materia (fermioni). Così l'elettrone

è il quanto del campo elettronico, e così via.

Carica di colore Proprietà posseduta dai quark in aggiunta al sapore (u, d, s, ecc.). Diversamente dalla carica elettrica, che è di due tipi (positiva e negativa), la carica di colore è di tre tipi: rosso, verde e blu. Naturalmente si tratta di nomi convenzionali, che non implicano una vera «colorazione» dei quark nel senso comune del termine. La forza di colore tra i quark è mediata da gluoni, anch'essi colorati.

Carica elettrica Proprietà posseduta dai quark e dai leptoni (ma anche dai più familiari protoni ed elettroni). La carica elettrica è di due tipi: positivo e negativo; il flusso delle cariche negative è alla base della comune corrente prodotta dalle centrali elettriche.

CERN Acronimo per Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare, fondato nel 1954 e ribattezzato Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire quando fu sciolto il Consiglio provvisorio, che però mantenne l'acronimo originale come nome. Il CERN si trova alla periferia nordorientale di Ginevra, a cavallo del confine tra Svizzera e Francia.

CMS Acronimo per Compact Muon Solenoid. È il nome di una delle due collaborazioni coinvolte nella caccia al bosone di Higgs al Large Hadron Collider del CERN.

Coppia di Cooper Se raffreddati al di sotto di una certa temperatura critica, gli elettroni di un superconduttore risentono di una debole mutua attrazione. Elettroni con quantità di moto e spin opposto si combinano a due a due (coppie di Cooper) e si muovono in maniera correlata attraverso il reticolo metallico, facilitati dalle vibrazioni di quest'ultimo. Le coppie hanno spin 0 o 1, e sono dunque bosoni. Di conseguenza, non c'è alcuna restrizione sul numero di coppie che può occupare un singolo stato quantistico, e a basse temperature si può verificare la cosiddetta «condensazione», che porta lo stato a dimensioni macroscopiche. Le coppie di Cooper in questo stato non risentono di alcuna resistenza nel loro moto attraverso il reticolo, e il risultato è la superconduttività.

Corrente neutra Interazione debole che comporta lo scambio di una Z_0 virtuale o una combinazione di scambi di W^+ e W^- virtuali (figg. 14 e 15).

Costante cosmologica Nel 1922 il teorico russo Aleksandr Fridman

trovò, nell'ambito della relatività generale, soluzioni delle equazioni di Einstein che descrivono uno spazio-tempo in espansione. Einstein inizialmente si era opposto all'idea che lo spazio-tempo si potesse espandere o contrarre e aveva «rattoppato» le equazioni per ottenere soluzioni stazionarie. Preoccupato dal fatto che la gravità potesse sopraffare la materia nell'universo facendolo collassare su sé stesso, Einstein aveva introdotto una «costante cosmologica» – una sorta di gravità repulsiva – per contrastare l'effetto. Quando iniziò a essere evidente che l'universo si stava davvero espandendo, Einstein si pentì della correzione, definendola il più grosso errore della sua vita. Ma nel 1998 nuove scoperte suggerirono che in realtà l'espansione dell'universo sta accelerando; combinati con le misure da satellite della radiazione cosmica di fondo, questi risultati hanno condotto all'ipotesi che l'universo sia pervaso da una «energia oscura» responsabile all'incirca del 73 per cento della massa-energia dell'universo. Una delle forme di energia oscura richiede la reintroduzione della costante cosmologica di Einstein.

Costante di Planck Indicata con h e scoperta da Max Planck nel 1900, è una costante fondamentale della fisica legata alle dimensioni fisiche dei quanti nella meccanica quantistica. L'energia dei singoli fotoni, per esempio, è proporzionale alla frequenza ν della radiazione secondo la legge $E = h\nu$. La costante di Planck vale $6,626 \times 10^{-34}$ Js.

Cromodinamica quantistica (QCD) Teoria di gauge SU(3) della forza di colore tra quark, mediata da un sistema di otto gluoni dotati di colore.

Decadimento beta Osservato per la prima volta da Henri Becquerel nel 1896 e così battezzato da Ernest Rutherford nel 1899, è un esempio di decadimento dovuto all'interazione debole. Comporta la trasformazione di quark d in un quark u all'interno di un neutrone, che diventa un protone, e l'emissione di un W^- . Quest'ultimo decade in un elettrone di alta velocità (raggio beta) e in un antineutrino elettronico.

Diffusione profondamente anelastica (deep inelastic scattering) Evento di diffusione (urto) di particelle in cui una frazione considerevole dell'energia della particella proiettile va nella distruzione della particella bersaglio. La particella proiettile emerge dalla collisione con un'energia molto inferiore a quella iniziale, e si produce uno spruzzo di adroni.

Dualità onda-particella Proprietà fondamentale di tutte le particelle quantistiche, che esibiscono sia un comportamento ondulatorio delocalizzato (per esempio con i fenomeni della diffrazione e dell'interferenza) sia localizzato corpuscolare, secondo il tipo di apparato di misura usato. Ipotizzata per la prima volta per le particelle di materia, come gli elettroni, da Louis de Broglie nel 1923.

Elemento I filosofi dell'antica Grecia credevano che ogni sostanza materiale fosse formata da quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. Un quinto elemento, chiamato etere o «quintessenza», fu introdotto da Aristotele per descrivere i cieli immutabili. Oggi questi elementi classici sono stati sostituiti da un sistema di elementi chimici, «fondamentali» nel senso che non si possono trasformare l'uno nell'altro chimicamente: ciò significa che sono composti da un solo tipo di atomi. Gli elementi sono organizzati in una «tavola periodica», dall'idrogeno all'uranio e oltre.

Elettrodinamica quantistica (QED) Teoria di gauge $U(1)$ della forza elettromagnetica agente tra particelle dotate di carica elettrica, mediata dai fotoni.

Eletttrone Scoperto nel 1897 da J. J. Thomson, l'eletttrone è un leptone appartenente alla prima generazione, con carica -1 , spin $1/2$ (fermione) e massa $0,51 \text{ MeV}$.

Elettronvolt (eV) Un elettronvolt è l'energia che acquista un singolo eletttrone accelerato da una differenza di potenziale elettrico di un volt. Una lampadina da 100 W consuma energia al ritmo di circa 600 miliardi di miliardi di elettronvolt al secondo.

Fattore g Costante di proporzionalità tra il momento angolare (quantizzato) di una particella elementare o composta e il suo momento magnetico, legato agli effetti rotazionali esercitati da un campo magnetico sulla particella. Esistono in realtà tre diversi fattori g dell'eletttrone: uno associato allo spin, uno al momento angolare dell'eletttrone nel suo moto orbitale in un atomo, e uno associato al momento angolare totale, somma dello spin e del momento angolare orbitale. La teoria quantistica relativistica di Dirac prevede per l'eletttrone un fattore g uguale a 2. Il valore raccomandato dal gruppo di lavoro CODATA nel 2006 era $2,0023193043622$. La differenza è dovuta a effetti di elettrodinamica quantistica.

Fermione Dal nome di Enrico Fermi. I fermioni sono caratterizzati da

numeri quantici di spin seminteri ($1/2$, $3/2$, ecc.), e comprendono quark, leptoni e molte particelle composte formate da combinazioni di quark, come i barioni.

Forza di colore La forza forte che tiene legati i quark e i gluoni negli adroni. Diversamente da forze più familiari come l'elettromagnetismo e la gravità, la forza di colore è caratterizzata da libertà asintotica: nel limite di distanza nulla, i quark si comportano come se fossero completamente liberi. La forza nucleare forte che lega insieme protoni e neutroni nei nuclei atomici è, si pensa, semplicemente un «residuo» della forza di colore che lega i quark nei nucleoni.

Forza elettrodebole Nonostante la grande differenza di scala tra la forza elettromagnetica e quella nucleare debole, si tratta di due facce della stessa medaglia, la forza unificata che si pensa fosse prevalente durante la cosiddetta «epoca elettrodebole», tra 10^{-36} e 10^{-12} secondi dopo il big bang. La combinazione delle forze elettromagnetica e debole in una teoria di campo $SU(2) \times U(1)$ è stata ottenuta per la prima volta da Steven Weinberg e, indipendentemente, da Abdus Salam nel 1967-68.

Forza elettromagnetica L'elettricità e il magnetismo furono riconosciuti come componenti di un'unica forza fondamentale grazie agli studi di molti fisici teorici e sperimentali, tra cui spiccano Michael Faraday e James Clerk Maxwell. La forza elettromagnetica permette agli elettroni di legarsi ai nuclei negli atomi e agli atomi di legarsi tra loro in molecole, dando origine all'enorme varietà delle sostanze molecolari.

Forza gravitazionale La forza di attrazione a cui è soggetta tutta la massa-energia. La gravità è estremamente debole e non gioca alcun ruolo nelle interazioni tra atomi, particelle subatomiche o elementari, che sono invece governate dalle forze di colore, debole ed elettromagnetica. La forza di gravità è descritta dalla teoria generale della relatività.

Forza nucleare debole La forza nucleare debole è così chiamata perché è considerevolmente più debole sia della forza nucleare forte, sia di quella elettromagnetica, per intensità e raggio d'azione. Le interazioni deboli riguardano sia i quark, sia i leptoni e ne possono cambiare il sapore, per esempio trasformando un quark u in un quark d, e un elettrone in un neutrino elettronico. Identificata come forza fondamentale in seguito allo studio dei decadimenti radioattivi beta, la forza debole è mediata dalle particelle W e Z. È

stata combinata con l'elettromagnetismo in una teoria di gauge $SU(2) \times U(1)$ da Steven Weinberg e Abdus Salam nel 1967-68.

Forza nucleare forte La forza nucleare forte, o forza di colore, lega insieme quark e gluoni negli adroni, ed è descritta dalla cromodinamica quantistica. La forza che tiene insieme neutroni e protoni nei nuclei atomici (chiamata anch'essa forza nucleare forte) è interpretata come «residuo» della forza di colore che lega i quark nei nucleoni. *Si veda* Forza di colore.

Fotone La particella elementare associata a qualunque forma di radiazione elettromagnetica, compresa la luce. Il fotone è un bosone privo di massa e di spin 1, che agisce da mediatore della forza elettromagnetica.

Funzione d'onda La descrizione matematica delle particelle di materia, per esempio gli elettroni, in termini di «onde di materia» conduce a equazioni tipiche del moto ondulatorio. Tali equazioni coinvolgono funzioni d'onda la cui ampiezza e la cui fase variano nel tempo e nello spazio. La funzione d'onda dell'elettrone nell'atomo di idrogeno dà luogo a caratteristiche distribuzioni tridimensionali attorno al nucleo chiamate orbitali. La meccanica ondulatoria – espressione della meccanica quantistica in termini di onde di materia – fu spiegata per la prima volta da Erwin Schrödinger nel 1926.

Giga Prefisso che indica un miliardo. Un gigaelettronvolt (GeV) è un miliardo di elettronvolt, 10^9 eV, 1000 MeV.

Gluone Mediatore della forza di colore tra quark. La cromodinamica quantistica richiede otto gluoni privi di massa e portatori essi stessi di carica di colore. Di conseguenza i gluoni risentono della forza, non si limitano a trasmetterla da una particella all'altra. Si ritiene che il 99 per cento della massa di protoni e neutroni sia dovuto all'energia trasportata dai gluoni.

Grado di libertà È il numero di dimensioni accessibili a un sistema o nel quale un sistema è libero di muoversi. Una particella classica è libera di muoversi in tre dimensioni spaziali. I fotoni sono particelle di spin 1 e massa nulla; di conseguenza, l'ampiezza della loro funzione d'onda è limitata a due sole dimensioni, esprimibili in termini di polarizzazione circolare destrorsa e sinistrorsa, o polarizzazione lineare verticale e orizzontale. Nel meccanismo di Higgs i bosoni privi di massa possono acquisire un terzo grado di libertà assorbendo un bosone di Nambu-Goldstone ([fig. 13](#), p. 89)

Gravitone Ipotetica particella che trasporta la forza gravitazionale nelle teorie di campo quantistiche della gravità. Nonostante i molti tentativi di sviluppare teorie di questo genere, ad oggi nessuno di essi ha dato risultati ritenuti soddisfacenti. Se esiste, il gravitone sarebbe un bosone privo di massa e di carica, e di spin 2.

Inflazione cosmica Rapida espansione esponenziale dell'universo che si ritiene sia avvenuta tra 10^{-36} e 10^{-32} secondi dopo il big bang. Scoperta da Alan Guth nel 1980 nel contesto delle teorie di grande unificazione, l'inflazione aiuta a spiegare le strutture su larga scala dell'universo che osserviamo oggi.

Isospin Noto anche come spin isotopico o isobarico. Introdotto da Werner Heisenberg nel 1932 per spiegare la simmetria tra il neutrone, da poco scoperto, e il protone. La simmetria di isospin è oggi considerata un caso particolare della più generale simmetria di sapore nelle interazioni adroniche. L'isospin di una particella si calcola a partire dal numero di quark u e d che la compongono.

Lambda-CDM Abbreviazione per *lambda-cold dark matter*, noto anche come «Modello Standard» della cosmologia del big bang. Il modello lambda-CDM spiega la struttura su larga scala dell'universo, la radiazione cosmica di fondo, l'espansione accelerata dell'universo e la distribuzione di elementi come idrogeno, elio, litio e ossigeno. Secondo il Modello il 73 per cento della massa-energia dell'universo è rappresentato da energia oscura (legata al valore della costante cosmologica lambda), il 22 per cento è materia oscura fredda, il che lascia all'universo visibile (galassie, stelle e pianeti) solo il 5 per cento.

Legge di conservazione Legge fisica secondo cui una proprietà specifica e misurabile di un sistema isolato non cambia all'evolvere del sistema nel tempo. Tra le proprietà misurabili per cui sono state stabilite leggi di conservazione ci sono la massa-energia, la quantità di moto, il momento angolare, la carica elettrica e quella di colore, l'isospin, ecc. Secondo il teorema di Noether, ogni legge di conservazione è dovuta a una specifica simmetria continua del sistema.

LEP Acronimo per Large Electron-Positron collider, il predecessore dell'LHC al CERN.

Leptone Dal greco *leptós* («sottile»). I leptoni sono particelle non soggette alla forza nucleare forte, che si combinano con i quark per formare la materia. Come i quark, anche i leptoni sono strutturati

in tre generazioni che comprendono l'elettrone, il muone e il tau (di carica -1 , spin $1/2$ e massa rispettivamente $0,51$ MeV, 106 MeV e $1,78$ GeV), e corrispondenti neutrini. Il neutrino dell'elettrone, quello del mu e quello del tau non hanno carica elettrica, hanno spin $1/2$ e si pensa abbiano una piccolissima massa (necessaria per spiegare il fenomeno delle oscillazioni, la «mescolanza» quantistica che rende possibile il cambiamento del sapore di un neutrino nel tempo).

LHC Acronimo per Large Hadron Collider («grande collisore adronico»). È l'acceleratore più grande del mondo, progettato per produrre collisioni protone-protone all'energia di 14 TeV. L'LHC ha una circonferenza di 27 chilometri ed è situato 175 metri al di sotto del confine franco-svizzero nei pressi di Ginevra. Operando a energie di collisione di 7 TeV e poi di 8 TeV, l'LHC ha fornito le evidenze sperimentali che hanno condotto, nel luglio 2012, alla scoperta di un nuovo bosone molto simile a quello di Higgs.

Libertà asintotica Proprietà della forza di colore che agisce tra quark. La forza di colore diminuisce in intensità all'avvicinarsi dei quark tra loro, cosicché nel limite asintotico di separazione nulla i quark si comportano come se fossero completamente liberi (fig. 16b, p. 126).

Luminosità La luminosità di un fascio di particelle nel caso di diffusione su un bersaglio fisso è data dal numero di particelle per unità di area per unità di tempo moltiplicato per il numero di particelle del bersaglio investite dal fascio. [Nel caso dei fasci di un collisore, la luminosità è proporzionale al numero di pacchetti in cui è suddiviso ciascun fascio, alla frequenza di rivoluzione delle particelle nell'acceleratore e al quadrato del numero di particelle contenute in un pacchetto, ed è inversamente proporzionale all'area trasversale del fascio]. Di particolare interesse è la luminosità integrata, che è semplicemente l'integrale (la somma) della luminosità nel tempo, solitamente espressa in unità per centimetro quadrato (cm^{-2}) o in barn inversi (10^{24} cm^{-2}). Il numero di collisioni che hanno come esito una certa reazione tra particelle elementari è semplicemente dato dalla luminosità integrata moltiplicata per la sezione d'urto (in unità di cm^2) della reazione, che ne misura la probabilità.

Materia oscura Scoperta nel 1934 dall'astronomo Fritz Zwicky come anomalia nella massa dell'ammasso di galassie della Chioma di Berenice, misurata sulla base del moto delle galassie vicine al bordo dell'ammasso, e confrontata con il numero di galassie

osservabili e con la luminosità totale dell'ammasso. Le due stime della massa totale differivano di un fattore 400. Qualcosa come il 90 per cento della massa necessaria a spiegare gli effetti gravitazionali osservati mancava all'appello, non era visibile, e fu in seguito chiamata «massa oscura». Studi successivi sembrano indicare che la massa mancante è di tipo «freddo» («cold dark matter», si veda Materia oscura fredda).

Materia oscura fredda (Cold Dark Matter, o CDM) Componente cruciale dell'attuale modello cosmologico λ -CDM del big bang, secondo il quale è responsabile di circa il 22 per cento della massa-energia dell'universo. La composizione della materia oscura fredda è sconosciuta; tuttavia si pensa che sia costituita in buona parte di materia «non barionica», ossia materia che non contiene protoni o neutroni, e molto probabilmente da particelle attualmente ignote al Modello Standard. Tra i candidati ci sono le ipotetiche «particelle massive debolmente interagenti» (o WIMP), con proprietà analoghe ai neutrini ma molto più pesanti e dunque più lente. Secondo le estensioni supersimmetriche del Modello Standard queste particelle potrebbero essere identificate con i neutralini.

Meccanismo di Higgs Così chiamato dal nome del fisico inglese Peter Higgs, è spesso citato aggiungendo i nomi di altri fisici che nel 1964 scoprirono indipendentemente il meccanismo. Uno dei nomi alternativi è «meccanismo BEHHGK», dai cognomi di Robert Brout, François Englert, Carl Hagen, Peter Higgs, Gerald Guralnik e Tom Kibble. Il meccanismo descrive come sia possibile aggiungere un campo di fondo – chiamato campo di Higgs – a una teoria quantistica di campo per «rompere» una simmetria della teoria. Nel 1967-68 Steven Weinberg e Abdus Salam usarono indipendentemente il meccanismo per sviluppare una teoria di campo della forza elettrodebole.

Mega Prefisso che denota un milione. Un megaelettronvolt (MeV) è un milione di elettronvolt, 10^6 eV o 1 000 000 eV.

Mesone Dal greco *mésos* («medio»). I mesoni sono una sottoclasse degli adroni. Sono soggetti alla forza nucleare forte e sono composti di un quark e un antiquark.

Mesone K I K sono un gruppo di mesoni di spin 0 contenenti un quark (o antiquark) strano, e quark u o d: comprendono il K^+ (u, anti-s), il K^- (anti-u, s) e il K_0 (una mescolanza di d-anti-s e s-anti-d), di massa rispettivamente 494 MeV ($K^\pm$) e 498 MeV (K_0).

Modello standard cosmologico Si veda Λ -CDM.

Modello Standard delle particelle elementari Il modello teorico attualmente accettato che descrive le particelle di materia e le forze a cui sono soggette, a eccezione della gravità. Il Modello Standard consiste in un insieme di teorie di campo quantistiche con simmetrie locali $SU(3)$ (forza di colore) e $SU(2) \times U(1)$ (forza nucleare debole ed elettromagnetismo). Il Modello comprende tre generazioni di quark e di leptoni, il fotone, le particelle W e Z, i gluoni e il bosone di Higgs.

Mole Unità standard per la quantità di una data sostanza chimica, pari al suo peso atomico o molecolare espresso in grammi. Una mole contiene $6,022 \times 10^{23}$ particelle. Il nome deriva da «molecola».

Molecola Unità fondamentale di sostanza chimica formata da due o più atomi. Una molecola di ossigeno consiste di due atomi di ossigeno, O_2 . Una molecola d'acqua consiste di due atomi di idrogeno e uno di ossigeno, H_2O .

MSSM Acronimo per Modello Standard Supersimmetrico Minimale. Estensione minimale del Modello Standard della fisica delle particelle che incorpora la supersimmetria, sviluppata nel 1981 da Howard Georgi e Savas Dimopoulos.

Muone Leptone della seconda generazione equivalente all'elettrone, con carica -1 , spin $1/2$ (fermione) e massa 106 MeV. Scoperto nel 1936 da Carl Anderson e Sethe Neddermeyer.

NAL Acronimo per il National Accelerator Laboratory di Chicago. Ribattezzato Fermi National Accelerator Laboratory, o Fermilab, nel 1974.

Neutrino I neutrini sono leptoni privi di carica e di spin $1/2$ (fermione), associati a elettrone, muone e tau, i leptoni di carica negativa. Si ritiene che possiedano una piccolissima massa, necessaria per spiegare il fenomeno delle oscillazioni, il mescolamento quantomeccanico che rende possibile la dipendenza dal tempo del sapore dei neutrini. L'oscillazione dei neutrini risolve il problema dei neutrini solari, ossia il fatto che flusso misurato di neutrini che investono la Terra è incompatibile con il numero atteso di neutrini elettronici prodotti dalle reazioni nucleari all'interno del Sole. Nel 2001 si è stabilito che solo il 35 per cento dei neutrini provenienti dal Sole è di tipo elettronico (quelli mancanti sono neutrini mu e neutrini tau): un'indicazione del fatto

che il sapore dei neutrini oscilla (ossia cambia) durante il tragitto dal Sole alla Terra.

Neutrone Particella subatomica neutra, scoperta nel 1932 da James Chadwick. Il neutrone è un barione che consiste di un quark u e due quark d. Ha spin $1/2$ e una massa di 940 MeV.

Nucleo La regione densa al centro di un atomo in cui è concentrata la maggior parte della sua massa. I nuclei atomici consistono di un numero variabile di protoni e neutroni. Il nucleo dell'atomo di idrogeno è composto di un unico protone.

Numero complesso Si chiama numero complesso la somma di un numero reale e di un numero immaginario. Un numero immaginario è un numero ottenuto moltiplicando un numero reale per la radice quadrata di -1 , indicata dal simbolo i . Il quadrato di un numero immaginario è quindi un numero negativo: per esempio, il quadrato di $5i$ è -25 . I numeri complessi sono ampiamente usati in matematica per risolvere problemi irrisolvibili con i soli numeri reali.

Numero quantico La descrizione dello stato fisico di un sistema quantistico richiede che se ne specifichino le proprietà in termini di energia totale, quantità di moto, momento angolare, carica elettrica, ecc. Una conseguenza della quantizzazione di queste grandezze è la comparsa, nella descrizione, di multipli dei quanti associati. Per esempio il momento angolare associato allo spin di un elettrone è fissato al valore $1/2 \times h/2\pi$, dove h è la costante di Planck. I numeri interi o seminteri che ricorrono a moltiplicare il valore del singolo quanto si chiamano numeri quantici. Rispetto a un campo magnetico esterno, lo spin dell'elettrone può trovarsi orientato parallelamente o antiparallelamente alle linee di forza, dando origine alle orientazioni «spin su» e «spin giù» caratterizzate dai numeri quantici $+1/2$ e $-1/2$. Altri esempi sono il numero quantico principale n , che caratterizza l'energia dei livelli elettronici negli atomi, la carica elettrica, la carica di colore dei quark, ecc.

Ottuplice Via (o Via dell'Ottetto) Schema inventato da Murray Gell-Mann e, indipendentemente, da Yuval Ne'eman, per classificare lo «zoo» delle particelle conosciute intorno al 1960, raggruppandole in due «ottetti». La struttura è basata su una simmetria globale SU(3) ed è formata disponendo le particelle in un diagramma secondo la loro carica elettrica (o isospin), e la loro stranezza. Lo schema trovò poi una spiegazione nel modello a quark.

Particelle W e Z Particelle elementari mediatrici della forza nucleare debole. I W sono bosoni di spin 1 con carica elettrica unitaria, positiva e negativa (W_+ , W_-) e massa di 80 GeV. La Z_0 è un bosone neutro di spin 1, con una massa di 91 GeV. Le particelle W e Z acquistano massa grazie al meccanismo di Higgs, e si possono pensare come fotoni «pesanti».

Partone Nome coniato nel 1968 da Richard Feynman per descrivere i costituenti puntiformi (le «parti») di protoni e neutroni. In seguito si dimostrò che i partoni sono quark e gluoni.

Pione (mesone π) Gruppo di mesoni di spin 0 formati da quark u e d e dai rispettivi antiquark. Comprendono il π_+ (u –anti-d), il π_- (d –anti-u) e il π_0 (miscela di d –anti-d e u –anti-u), con masse di 140 MeV ($\pi_{\pm}$) e 135 MeV (π_0).

Positrone Antiparticella dell'elettrone, indicata con e_+ , di carica + 1, spin 1/2 (fermione) e massa 0,51 MeV. Il positrone fu la prima antiparticella a essere scoperta, da Carl Anderson nel 1932.

Principio di esclusione (principio di Pauli) Scoperto da Wolfgang Pauli nel 1925, il principio di esclusione afferma che due fermioni identici non possono occupare lo stesso stato quantistico (cioè possedere gli stessi numeri quantici) simultaneamente. Nel caso degli atomi questo significa che al massimo due elettroni possono occupare un dato orbitale atomico, a patto che abbiano spin opposto.

Principio di indeterminazione Scoperto da Werner Heisenberg nel 1927, il principio di indeterminazione afferma che esiste un limite fondamentale alla precisione con cui è possibile misurare coppie di variabili «coniugate», quali posizione e quantità di moto, energia e tempo. Il principio si può ricondurre alla fondamentale dualità tra comportamento ondulatorio e corpuscolare degli oggetti quantistici.

Protone Particella subatomica di carica positiva «scoperta» e battezzata da Ernest Rutherford nel 1919. Rutherford in realtà scoprì che il nucleo dell'atomo di idrogeno (che è un singolo protone) è un costituente fondamentale di altri nuclei atomici. Il protone è un barione formato da due quark u e un quark d, ha spin 1/2 e massa 938 MeV.

Quanto Unità fondamentale e indivisibile di grandezze fisiche come l'energia e il momento angolare. Nella teoria dei quanti queste

grandezze non sono variabili continue, ma sono organizzate in pacchetti discreti chiamati quanti. L'uso del termine viene esteso ad indicare anche le particelle: il fotone, per esempio, è il quanto del campo elettromagnetico. L'idea può essere estesa dai mediatori di forza alle stesse particelle di materia: l'elettrone è il quanto del campo elettronico, e così via. Talvolta questa è chiamata seconda quantizzazione.

Quark I costituenti elementari degli adroni. Tutti gli adroni sono composti da triplette di quark di spin $1/2$ (barioni), o da combinazioni di un quark e un antiquark (mesoni). I quark formano tre generazioni, ciascuna con «sapori» diversi. Il quark u (up) e il quark d (down), di carica elettrica rispettivamente $+2/3$ e $-1/3$, e massa 1,7-3,3 MeV e 4,1-5,8 MeV, formano la prima generazione. I protoni e i neutroni sono composti di quark u e d. La seconda generazione consiste nei quark c (charm) e s (strange), di carica elettrica $+2/3$ e $-1/3$, e massa rispettivamente 1,27 GeV e 101 MeV; la terza comprende il quark t (top) e il quark b (bottom), di carica elettrica $+2/3$ e $-1/3$, e massa rispettivamente 172 GeV e 4,19 GeV. I quark trasportano anche carica di colore: ogni sapore di quark può avere carica verde, rossa o blu.

Quark bottom Chiamato anche quark *beauty* («bellezza») o semplicemente quark b, è un quark appartenente alla terza generazione, con carica elettrica $-1/3$, spin $1/2$ (è un fermione) e massa «nuda» di 4,19 GeV. Fu scoperto al Fermilab nel 1977 attraverso l'osservazione dell' Υ , un mesone formato dal quark bottom e dal corrispondente antiquark.

Quark charm Quark appartenente alla seconda generazione, con carica elettrica $+2/3$, spin $1/2$ (fermione) e «massa nuda» di 1,27 GeV. Fu scoperto contemporaneamente al Brookhaven National Laboratory e allo SLAC durante la «rivoluzione di novembre» del 1974, attraverso l'osservazione della J/ψ , un mesone formato dal quark charm e dal corrispondente antiquark.

Quark strange Quark appartenente alla seconda generazione, con carica $-1/3$, spin $1/2$ (fermione) e una massa di 101 MeV. La proprietà detta «stranezza» fu identificata come caratteristica di una serie di particelle di massa relativamente bassa, scoperte negli anni Quaranta e Cinquanta, da Murray Gell-Mann e, indipendentemente, da Kazuhiko Nishijima e Tadao Nakano. La proprietà fu in seguito spiegata da Gell-Mann e George Zweig con la presenza, in queste particelle composte, del quark «strano» (fig. 11, p. 84).

Quark top Talvolta chiamato anche *truth* («verità»). Quark appartenente alla terza generazione, con carica $+ 2/3$, spin $1/2$ (fermione) e una massa di 172 GeV. È stato scoperto al Fermilab nel 1995.

Radiazione cosmica di fondo Circa 380 000 anni dopo il big bang l'universo si era espanso e raffreddato abbastanza da permettere ai nuclei di idrogeno (protoni) e di elio (fatti di due protoni e due elettroni) di ricombinarsi con gli elettroni formando atomi neutri di idrogeno e di elio. A questo punto l'universo divenne «trasparente» per la radiazione calda residua. L'ulteriore espansione ha raffreddato e spostato in frequenza questa radiazione alla regione delle microonde, con una temperatura di appena 2,7 K ($-270,5^{\circ}\text{C}$), di pochi gradi sopra lo zero assoluto. Predetta da diversi teorici, la radiazione di fondo fu scoperta per caso da Arno Penzias e Robert Wilson nel 1964, ed è stata in seguito studiata in dettaglio dai satelliti COBE e WMAP.

Radioattività beta Si veda Decadimento beta.

Raggi cosmici Flusso di particelle cariche di alta energia provenienti dallo spazio, che investe costantemente gli strati alti dell'atmosfera terrestre. L'uso del termine «raggi» risale ai primi tempi della ricerca sulla radioattività, quando veniva usato in generale per indicare flussi di particelle cariche con una direzione precisa. I raggi cosmici sono originati da sorgenti diverse, tra cui i processi ad alta energia che hanno luogo sulla superficie del Sole e di altre stelle, e altri processi tuttora sconosciuti verificatisi altrove. Le particelle presenti nei raggi cosmici hanno tipicamente energie tra i 10 MeV e i 10 GeV.

Raggio beta Elettrone di alta velocità emesso dal nucleo di un atomo soggetto a decadimento radioattivo beta. Si veda Decadimento beta.

Relatività generale Sviluppata da Einstein nel 1915, la teoria generale della relatività incorpora la relatività speciale e la teoria newtoniana della gravitazione universale in una teoria geometrica della gravità. Einstein sostituisce l'«azione a distanza» implicata dalla teoria di Newton con il moto di corpi massicci in uno spazio-tempo curvo. In relatività generale la materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi, e lo spazio-tempo curvo dice alla materia come muoversi.

Relatività speciale (o ristretta) Sviluppata da Einstein nel 1905, la teoria

speciale della relatività afferma che tutti i moti sono relativi e che non esiste un sistema di riferimento privilegiato rispetto al quale si può definire e misurare il moto. Tutti i sistemi di riferimento inerziali sono equivalenti: un osservatore fermo sulla Terra deve ottenere gli stessi risultati di misure fisiche di un osservatore che si sta muovendo con velocità uniforme su una navicella spaziale. Saltano i concetti classici di spazio e tempo assoluti, di quiete assoluta e di simultaneità. Nel formulare la teoria, Einstein postulò che la velocità della luce nel vuoto rappresenti un limite che non può essere superato. La teoria è speciale o ristretta solo nel senso che non tratta i sistemi accelerati, di cui si occupa invece la relatività generale.

Rinormalizzazione Una delle conseguenze dell'introdurre le particelle come quanti dei campi è che esse possono essere soggette ad auto-interazione, ossia interagire con il proprio campo. Questo significa che le tecniche come la teoria delle perturbazioni, usata per risolvere le equazioni del campo, tendono a divergere, dato che i termini di auto-interazione appaiono come correzioni infinite. La rinormalizzazione è un metodo matematico sviluppato per eliminare questi termini di auto-interazione, ridefinendo i parametri (come la massa e la carica) delle particelle di campo.

Rottura di simmetria La rottura spontanea di simmetria si verifica quando lo stato di energia minima di un sistema fisico ha un grado di simmetria inferiore rispetto a stati di energia più elevata. Quando il sistema perde energia e si stabilizza nello stato di energia minima la simmetria si riduce, o si «rompe», spontaneamente. Per esempio una matita perfettamente in equilibrio sulla punta è simmetrica, ma prima o poi cadrà, dando origine a uno stato meno simmetrico in cui la matita punta in una specifica direzione orizzontale.

Sapore Proprietà che distingue tra loro i tipi di quark, oltre alla carica di colore. Esistono sei diversi sapori di quark organizzati in tre generazioni: up (u), charm (c) e top (t), con carica elettrica $+2/3$, spin $1/2$ e massa rispettivamente di 1,7-3,3 MeV, 1,27 GeV e 172 GeV; down (d), strange (s) e bottom (b) con carica elettrica $-1/3$, spin $1/2$ e massa rispettivamente di 4,1-5,8 MeV, 101 MeV e 4,19 GeV. Il termine sapore è usato anche per i leptoni: l'elettrone, il muone, il tau, nonché i rispettivi neutrini, si distinguono l'uno dall'altro per il «sapore leptonico» (si veda Leptone).

Simmetria di gauge Nome coniato dal matematico Hermann Weyl. Nel caso delle teorie quantistiche di campo, si sceglie una «gauge» [una

trasformazione dei campi] rispetto a cui le equazioni sono invarianti (variazioni arbitrarie nella gauge non cambiano i risultati fisici). Il legame tra simmetrie di gauge e leggi di conservazione (*si veda* Legge di conservazione e Teorema di Noether) implica che la giusta scelta di simmetria di gauge può condurre a una teoria di campo che rispetta automaticamente la necessità di una legge di conservazione per la proprietà studiata.

Sincrotrone Tipo di acceleratore in cui il campo elettrico usato per accelerare le particelle e il campo magnetico usato per farle circolare in un anello vengono accuratamente sincronizzati con il fascio.

Spin Tutte le particelle elementari possiedono un tipo di momento angolare chiamato spin. Lo spin dell'elettrone fu inizialmente interpretato in termini di rotazione della particella sul suo asse (come una trottola), tuttavia lo spin è un fenomeno quantistico «relativistico» che non ha controparte nella fisica classica. Le particelle sono caratterizzate da un numero quantico di spin: quelle con numeri di spin seminteri sono dette fermioni; quelle con numeri interi, bosoni. Le particelle di materia sono fermioni, quelle di forza sono bosoni.

Spostamento di Lamb (Lamb shift) Piccola differenza tra due livelli energetici dell'elettrone nell'atomo di idrogeno, scoperta da Willis Lamb e Robert Retherford nel 1947. Lo spostamento di Lamb fornì un importante indizio che condusse allo sviluppo delle procedure di rinormalizzazione e, in ultima analisi, all'elettrodinamica quantistica.

SSC Acronimo per Superconducting SuperCollider, un progetto americano per la costruzione del più grande acceleratore del mondo a Waxahachie nella contea di Ellis, in Texas, che avrebbe dovuto raggiungere energie di collisione di 40 TeV. Il progetto fu cancellato dal Congresso statunitense nell'ottobre del 1993.

Stranezza Identificata come proprietà caratteristica di particelle come la Λ (lambda) neutra, le particelle Σ (sigma) e Ξ (csi) cariche o neutre, e i mesoni K, la stranezza fu usata assieme alla carica elettrica e all'isospin da Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman per classificare le particelle secondo l'«Ottuplice Via» (fig. 9). La proprietà fu in seguito spiegata con la presenza, in queste particelle composte, del quark s (strano) (fig. 11).

SU(2), gruppo di simmetria Il gruppo speciale delle trasformazioni

unitarie di due variabili complesse. Individuato da Chen Ning Yang e Robert Mills come gruppo di simmetria su cui fondare una teoria della forza nucleare forte, $SU(2)$ fu in seguito identificato con la forza debole e, combinato con il gruppo $U(1)$ della teoria di gauge dell'elettromagnetismo, forma la teoria di gauge $SU(2) \times U(1)$ della forza elettrodebole.

SU(3), gruppo di simmetria Il gruppo speciale delle trasformazioni unitarie di tre variabili complesse. Individuato da Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman come simmetria globale su cui costruire l'Ottuplice Via, fu poi usato dallo stesso Gell-Mann, da Harald Fritzsch e da Heinrich Leutwyler come simmetria locale su cui basare una teoria di gauge della forza nucleare forte (o di colore) tra quark e gluoni.

Superconduttività Scoperta nel 1911 da Heike Kamerlingh Onnes. Se raffreddati al di sotto di una certa temperatura critica, alcuni materiali cristallini perdono ogni resistività elettrica e diventano superconduttori. In un cavo superconduttore la corrente elettrica può circolare indefinitamente, senza bisogno di energia fornita dall'esterno. La superconduttività è un fenomeno quantistico spiegato dal meccanismo BCS, così chiamato dalle iniziali di John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer.

Supersimmetria (SUSY) Alternativa al Modello Standard nella quale l'asimmetria tra particelle di materia (fermioni) e particelle di forza (bosoni) è spiegata in termini di una supersimmetria rotta. Ad alte energie (per esempio quelle che dominavano nei primissimi istanti successivi al big bang), la supersimmetria non sarebbe più rotta, e ci sarebbe simmetria perfetta tra fermioni e bosoni. La supersimmetria prevede anche l'esistenza di una serie di super-partner pesanti delle particelle ordinarie, da cui i super-partner differiscono, oltre che per la massa, per il valore dello spin, diverso di $1/2$. I partner supersimmetrici dei fermioni sono chiamati sfermioni: quello dell'elettrone si chiama seletrone, mentre a ogni quark corrisponde uno squark. Analogamente, a ogni bosone corrisponde un bosino: i partner supersimmetrici del fotone, del W, della Z e dei gluoni si chiamano fotino, wino, zino e gluino. Sebbene la supersimmetria risolva molti problemi del Modello Standard, non si è ancora trovata alcuna evidenza dell'esistenza dei super-partner.

Teorema di Noether Dimostrato da Amalie Emmy Noether nel 1918, il teorema lega le leggi di conservazione a specifiche simmetrie continue che caratterizzano sistemi fisici considerati e le teorie che

li descrivono, e che vengono usate come strumento per sviluppare teorie nuove. La conservazione dell'energia rispecchia il fatto che le leggi del sistema fisico considerato sono invarianti per «traslazioni» temporali. La conservazione della quantità di moto discende dall'invarianza delle leggi fisiche per traslazioni spaziali, mentre quella del momento angolare dall'invarianza per rotazioni rispetto a un dato centro.

Teoria delle perturbazioni Metodo matematico usato per trovare soluzioni approssimate a equazioni che non si possono risolvere esattamente. L'equazione viene riscritta come sviluppo perturbativo, ossia come somma di una serie potenzialmente infinita di termini il primo dei quali, il «termine di ordine zero» è risolvibile esattamente. A questo vengono aggiunti termini «perturbativi» che rappresentano correzioni al primo, secondo, terzo ordine, e così via. In linea di principio ogni nuovo termine dello sviluppo fornisce correzioni sempre più piccole al calcolo di ordine zero, avvicinando sempre più il risultato a quello corretto. L'accuratezza del risultato finale dipende allora dal numero di termini perturbativi inclusi nel calcolo. Anche se si tratta di una cosa strutturalmente molto diversa, possiamo farci un'idea di come funziona l'espansione perturbativa considerando lo sviluppo in serie di potenza di una funzione trigonometrica semplice come il seno, $\sin(x)$. I primi termini dello sviluppo sono $\sin x = x - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + \dots$ Per $x = 45^\circ$ (0,785398 radianti) il primo termine dà 0,785398, da cui sottraiamo 0,080745, quindi aggiungiamo 0,002490 e sottraiamo 0,000037. Ciascun nuovo termine dà una correzione sempre più piccola, e dopo solo quattro termini abbiamo il risultato 0,707106, da confrontare con $\sin(45^\circ) = 0,707107$.

Teoria di gauge Teoria fondata su una simmetria di gauge (*vedi*). La teoria generale della relatività è una teoria di gauge invariante rispetto a cambiamenti arbitrari del sistema di coordinate (la «gauge»). L'elettrodinamica quantistica (QED) è una teoria quantistica di campo invariante rispetto a variazioni di fase della funzione d'onda dell'elettrone. Negli anni Cinquanta il problema di sviluppare una teoria di campo delle forze nucleari debole e forte si era ricondotto a identificare le corrette quantità conservate, e da lì le opportune simmetrie di gauge.

Teoria di grande unificazione (GUT) Qualunque teoria che cerchi di unificare le forze elettromagnetica, debole e forte in una singola struttura è un esempio di teoria di grande unificazione. Il primo esempio di GUT fu sviluppato da Sheldon Glashow e Howard Georgi

nel 1974. Le GUT non cercano di includere la gravità: le teorie che ci provano sono in genere chiamate Teorie del Tutto (TOE).

Teoria di Yang e Mills Forma di teoria quantistica di campo basata sull'invarianza di gauge sviluppata nel 1954 da Chen Ning Yang e Robert Mills. La teoria di Yang e Mills è alla base di tutte le componenti dell'attuale Modello Standard delle particelle elementari.

Tera Prefisso che indica mille miliardi. Un teraelettronvolt (TeV) è pari a mille miliardi di elettronvolt, 10^{12} eV, o 1000 GeV.

U(1), gruppo di simmetria Il gruppo delle trasformazioni unitarie di una variabile complessa. È equivalente (il termine tecnico è «isomorfo») al gruppo del cerchio, il gruppo moltiplicativo dei numeri complessi di modulo unitario (il cerchio unitario nel piano complesso). È anche isomorfo a $SO(2)$, il gruppo speciale ortogonale che descrive la trasformazione di simmetria consistente nella rotazione di un oggetto in due dimensioni. In elettrodinamica quantistica $U(1)$ è identificato con la simmetria di fase della funzione d'onda dell'elettrone (fig. 6).

Valore di aspettazione nel vuoto In meccanica quantistica i valori di grandezze osservabili quali l'energia sono espressi dal cosiddetto valore di aspettazione (o valor medio) di operatori quantistici corrispondenti alle osservabili considerate. Gli operatori sono funzioni matematiche che agiscono sulle funzioni d'onda, cambiandole. Il valore di aspettazione nel vuoto è il valore di aspettazione di un dato operatore applicato allo stato di vuoto. A causa della forma della sua curva di energia potenziale, il campo di Higgs ha un valore di aspettazione nel vuoto non nullo, che rompe la simmetria della forza elettrodebole (fig. 12).

BIBLIOGRAFIA

- Baggott, Jim, *Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory*, Oxford University Press, 2003.
- Baggott, Jim, *The Quantum Story: A History in 40 Moments*, Oxford University Press, 2011.
- Cashmore, Roger, Maiani, Luciano, e Revol, Jean-Pierre (a cura di), *Prestigious Discoveries at CERN*, Springer, Berlin, 2004.
- Coughlan, Guy D., e Dodd, James E., *The Ideas of Particle Physics: An Introduction for Scientists*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- Crease, Robert P. e Mann, Charles C., *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Rutgers University Press, 1986.
- Dodd, J.E., *The Ideas of Particle Physics*, Cambridge University Press, 1984.
- Enz, Charles P., *No Time to be Brief: a Scientific Biography of Wolfgang Pauli*, Oxford University Press, 2002.
- Evans, Lyndon (a cura di), *The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology*, CRC Press, London, 2009.
- Farmelo, Graham (a cura di), *It Must be Beautiful: Great Equations of Modern Science*, Granta Books, London, 2002 [*Equilibrio perfetto. Le grandi equazioni della scienza moderna*, trad. it. di L. Sosio, il Saggiatore, Milano, 2005].
- Feynman, Richard P., *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin, London, 1985 [*QED. La strana teoria della luce e della materia*, trad. it. di F. Nicodemi, Adelphi, Milano, 1989].
- Gell-Mann, Murray, *The Quark and the Jaguar*, Little, Brown & Co., London, 1994 [*Il quark e il giaguaro. Avventure nel semplice e nel complesso*, trad. it. di L. Sosio, Bollati Boringhieri, Torino, 1996].
- Gleick, James, *Genius: Richard Feynman and Modern Physics*, Little, Brown & Co., London, 1992 [*Genio. La vita e la scienza di Richard*

Feynman, trad. it. di S. Minucci, Garzanti, Milano, 1994].

Greene, Brian, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory*, Vintage Books, London, 2000 [L'universo elegante. Superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima, a cura di C. Bartocci, trad. it. di L. Civalieri e C. Bartocci, Einaudi, Torino, 2000].

Greene, Brian, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality*, Allen Lane, London, 2004 [La trama del cosmo, a cura di C. Bartocci, trad. it. di L. Civalieri e A. Tissoni, Einaudi, Torino, 2004].

Gribbin, John, *Q is for Quantum: Particle Physics from A to Z*, Weidenfeld & Nicholson, London, 1998 [Q come quanto. Dall'acceleratore di particelle alla teoria del punto zero, trad. it. di S. Orrao, Macro Edizioni, Diegaro di Cesena, 2004].

Guth, Alan H., *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Vintage, London, 1998.

Halpern, Paul, *Collider: The Search for the World's Smallest Particles*, John Wiley, New Jersey, 2009.

Hoddeson, Lillian, Brown, Laurie, Riordan, Michael, e Dresden, Max, *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Cambridge University Press, 1997.

Johnson, George, *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Vintage, London, 2001.

Kane, Gordon, *Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of the Universe*, Perseus Books, Cambridge, MA, 2000 [Supersimmetria. Squark, fotini, sparticelle: svelare le leggi ultime della natura, trad. it. di S. Ravaioli, Bollati Boringhieri, Torino, 2005].

Kragh, Helge, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press, 1999.

Lederman, Leon (con Dick Teresi), *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?*, Bantam Press, London, 1993 [La particella di Dio. Se l'universo è la domanda, qual è la risposta?, trad. it. di A. Artosi e M. D'Agostino, Mondadori, Milano, 1996].

Mehra, Jagdish, *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman*, Oxford University Press, 1994.

- Nambu, Yoichiro, *Quarks*, World Scientific, Singapore, 1981.
- Pais, Abraham, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982 [*Sottile è il Signore. La scienza e la vita di Albert Einstein*, trad. it. di T. Cannillo, Boringhieri, Torino, 1986].
- Pais, Abraham, *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press, 1986.
- Pickering, Andrew, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*, University of Chicago Press, 1984.
- Riordan, Michael, *The Hunting of the Quark: A True Story of Modern Physics*, Simon & Shuster, New York, 1987.
- Sambursky, S., *The Physical World of the Greeks*, 2a ediz., Routledge & Kegan Paul, London, 1963 [*Il mondo fisico dei greci*, trad. it. di V. Geymonat, Feltrinelli, Milano, 1967].
- Sample, Ian, *Massive: The Hunt for the God Particle*, Virgin Books, London, 2010.
- Schweber, Silvan S., *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, Tomonaga*, Princeton University Press, 1994.
- Stachel, John (a cura di), *Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, 2005 [*L'anno memorabile di Einstein. I cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del Novecento*, trad. it. di E. Ioli, Dedalo, Bari, 2000].
- 't Hooft, Gerard, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press, 1997.
- Veltman, Martinus, *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics*, World Scientific, London, 2003.
- Weinberg, Steven, *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature*, Vintage, London, 1993 [*Il sogno dell'unità dell'universo*, trad. it. di G. Rigamonti, Mondadori, Milano, 1993].
- Weyl, Hermann, *Symmetry*, Princeton University Press, 1952 [*La simmetria*, trad. it. di G. Lopez, Feltrinelli, Milano, 1962].
- Wilczek, Frank, *The Lightness of Being: Big Questions, Real Answers*,

Allen Lane, London, 2009 [*La leggerezza dell'essere. La massa, l'etere e l'unificazione delle forze*, trad. it. di S. Frediani, Einaudi, Torino, 2009].

Woit, Peter, *Not Even Wrong*, Vintage Books, London, 2007 [*Neanche sbagliata. Il fallimento della teoria delle stringhe e la corsa all'unificazione delle leggi della fisica*, trad. it. di A. Migliori e F. Lonegro, Codice, Torino, 2007].

Zee, A., *Fearful Symmetry: The Search for Beauty in Modern Physics*, Princeton University Press, 2007 (1ª ediz. 1986).

NOTA DEL CURATORE

Dopo l'euforia respirata al CERN nel luglio 2012 in occasione dell'ormai celebre presentazione congiunta dei risultati di ATLAS e CMS, con il raggiungimento da parte di entrambi gli esperimenti della fatidica soglia dei «5 sigma» e dunque l'annuncio ufficiale della scoperta, il clima che si avvertiva nell'attesa dei risultati aggiornati era un misto tra speranze e timore. Anche se nessuno osava paventarla, esisteva la possibilità – per quanto scarsa – che l'eccesso osservato si riducesse, obbligando i fisici a una imbarazzante «retromarcia» (la vicenda dei neutrini più veloci della luce era ancora vicina). Le aspettative più realistiche e promettenti erano tuttavia rivolte alle prime misure delle proprietà del nuovo bosone.

La conferenza «Les Rencontres de Moriond», che si tiene tutti gli anni alla fine dell'inverno in una località delle Alpi (da qualche anno a La Thuile, in Val d'Aosta), è uno dei tradizionali appuntamenti in cui i fisici delle particelle fanno il punto della situazione sperimentale. Qui, a inizio marzo 2013, rappresentanti di ATLAS e di CMS hanno presentato l'aggiornamento dei risultati dopo l'inclusione delle collisioni registrate in tutto il 2012.

A fine dicembre 2012 l'LHC ha terminato la presa dati a 8 TeV. L'acceleratore rimarrà inattivo per circa due anni, durante i quali sarà messo in grado di raggiungere energie di collisione di 13 TeV (avvicinandosi ai 14 TeV per cui era stato inizialmente progettato); anche gli apparati sperimentali delle varie collaborazioni verranno migliorati e «ristrutturati» per far fronte all'aumento dell'energia e del numero delle collisioni. I dati registrati fino al 2012 costituiranno quindi per un periodo relativamente lungo i soli a disposizione: è per questo che i risultati presentati alla conferenza di Moriond, pur non essendo «definitivi», rappresentano una tappa importante.

I risultati hanno confermato in maniera ormai inequivocabile la scoperta di un bosone di massa 126 GeV (cioè circa 134 volte più pesante di un protone). Il bosone è stato osservato non solo nel decadimento in due fotoni, ma anche in due particelle Z, in due particelle W e, nel caso di CMS, anche in coppie di leptoni tau. Il numero di eventi osservati nelle singole modalità di decadimento risulta perfettamente compatibile, entro le fluttuazioni statistiche, con quanto previsto dal Modello Standard per un bosone di Higgs di massa 126 GeV.

Come ci si attendeva, è stato possibile iniziare a sondare le proprietà «rotazionali» del bosone: anche in questo settore le ipotesi

diverse da quella prevista dal Modello Standard, sebbene non definitivamente escluse, appaiono decisamente sfavorite dai dati: l'ipotesi che il bosone abbia spin 2 anziché 0, per esempio, è esclusa a un «livello di fiducia» di più del 99 per cento; allo stesso modo è escluso che il bosone abbia parità (una proprietà che ne descrive il comportamento «allo specchio») negativa.

Sembra dunque ormai assodato che la particella la cui scoperta è stata annunciata con giustificato clamore nel 2012 sia davvero un bosone di Higgs (o «bosone BEH»), secondo una certa corrente di pensiero più politicamente corretta): ne ha tutta l'aria, e per ora tutte le caratteristiche misurabili con la precisione permessa dalla quantità di collisioni a disposizione risultano compatibili con questa ipotesi. Non siamo tuttavia ancora certi di *quale* bosone di Higgs si tratti: se sia uno dei vari bosoni previsti dalle teorie supersimmetriche, per esempio, con cui i dati sono tuttora compatibili, o invece un Higgs composito, oppure, più semplicemente il bosone di Higgs del Modello Standard.

Il solo modo per saperlo sarà quello di avere a disposizione una quantità molto maggiore di dati. Ciò permetterà di misurare con maggior precisione le proprietà del bosone, la cui scoperta, pur costituendo un traguardo notevole della fisica delle particelle, non rappresenta certo una conclusione. Tante rimangono infatti le domande ancora aperte nello stesso Modello Standard che, ormai si sa, ha difficoltà a rappresentare una descrizione completa e autosufficiente della fisica fondamentale. Questa scoperta apre la strada a una nuova entusiasmante stagione: se da una parte la fisica del bosone di Higgs passerà dall'epoca della ricerca a quella delle misure di precisione, dall'altra la ricerca di nuova fisica, nuove particelle e nuovi fenomeni deve continuare, e continuerà, perché tanti sono ancora i problemi aperti nella comprensione a livello fondamentale dell'Universo.

Franco Ligabue
Scuola Normale Superiore di Pisa -
Collaborazione CMS

INDICE ANALITICO

acceleratori

– di particelle

– di protoni

– lineari

acqua, peso molecolare

Adler, Stephen

adroni

– composizione in termini di quark

– con charm

– inclusione nella teoria elettrodebole

– prudenza di Weinberg

Álvarez, Luis

Ammasso della Chioma

Anderson, Carl

Anderson, Philip

annichilazione elettrone-positrone

antimateria

antineutrino/i

– muonico

antiprotoni

– concentrare le energie

– *si veda anche* collisori protone-antiprotone

antiquark

– strani

armi nucleari, *si veda* bomba atomica

Arosa (Svizzera)

Aspen Center for Physics (Colorado)

«assi» (schema di Zweig)

atomo/i

– forze all'interno

– nella filosofia greca

– trasmutabilità

Austin Chalk (Texas)

Bacone, Francesco

Bardeen, John

Bardeen, William

barioni

– che si comportano come bosoni

- composizione in termini di quark
- «incantati»
- Via dell'Ottetto

barn (unità di misura)

Berkeley

Berners-Lee, Tim

Bethe, Hans

Bevatron

big bang

- modello λ -CDM n. 5

big science («scienza in grande»)

Bjorken, James

Block, Richard

Bohm, David

Bohr, Niels

bomba atomica

bombardamento con neutroni

- di atomi di uranio

Bose, Satyendra Nath

bosino

bosone di Higgs

- canali di decadimento
- come «particella di Dio»
- controversia negli USA sulla sua ricerca
- importanza
- interesse del pubblico
- possibilità che non venisse scoperto
- problema della sua massa; risolto dalla supersimmetria
- restrizione dell'intervallo di massa permesso
- ricerca al LEP
- ricerca all'LHC
- scoperta
- sezione d'urto e produzione
- spiegato ai politici
- stima della massa
- voci della sua scoperta sulla blogosfera

bosoni

- supersimmetria e

bosoni di Nambu-Goldstone

Boxer Indemnity

Brahe, Tycho

Brookhaven National Laboratory

- Cosmotron
- ISABELLE

- Sincrotrone a gradiente alternato (AGS)

Brout, Robert
Bush, George
Butterworth, Jon

calamiten. 1

California Institute of Technology (Caltech)

calorimetri adronici

camera a bolle

camera a nebbia

campi

campo/i di Higgs

- acquisizione della massa e

- armeggio teorico

- cristallizzazione nell'epoca della grande unificazione

- cristallizzazione nell'epoca elettrodebole

- curva di energia potenziale

- importanza

- invenzione

- spiegato ai politici

«campo B»

campo scalare

carica di colore

- «schermata»

carica elettrica

- classificazione nell'Ottuplice Via e

Casper, Dave («Ghost»)

CERN (Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare)

- camera a bolle Gargamelle n. 12

- finanziamenti n. 5

- Intersecting Storage Rings (ISR)

- istituzione

- procedura per gli annunci di grande impatto

- ricerca delle correnti neutre

- ricerca delle particelle W e Z

- scoperta delle particelle W e Z

- Super Proton Synchrotron (SPS)

- Underground Area 1 (UA1)

- Underground Area 2 (UA2)

Chadwick, James

Chicago, Università di

ciclotroni

Cline, David

Clinton, Bill

Cockcroft, John

collisioni

– elettrone-positrone

– elettrone-protone

– neutrini muonici-nucleoni; eventi senza muoni

– protone-antiprotone

– protone-elettrone

– protone-protone; nella regione «in avanti»

– quark-quark

collisori

– di particelle

– protone-antiprotone

– protone-protone

Columbia University

conservazione della carica elettrica

– ricerca di una simmetria continua

– simmetria di fase della funzione d'onda dell'elettrone

– superconduttività e

conservazione della quantità di moto

– e invarianza rispetto alle traslazioni continue nello spazio

costante cosmologica

contributo a un *loop*

Cooper, Leon

coppie

– elettrone-positrone

– quark-antiquark

Cornell University

correnti deboli neutre

– conferma sperimentale

– ricerca

correzioni a *loop*

cosmologia

– inflazionaria

covarianza generale

Cox, Brian

cromodinamica quantistica (QCD)

curva di energia potenziale

Darriulat, Pierre

Dayan, Moshe

De Broglie, Louis

decadimento beta

– modello a quark

– modello di Schwinger

- teoria di Fermi

Democrito

Desertron; *si veda anche* Superconducting SuperCollider

Di Lella, Luigi

diffusione

- anelastica; profondamente a.
- elastica

dipartimento per l'Energia (USA)

Dirac, Paul

- teoria quantistica relativistica

disarmo nucleare

Dorigo, Tommaso

dualismo onda/particella

Dukas, Helen

Dyson, Freeman

$$E = mc^2$$

ebrei, interdetti dall'amministrazione pubblica

Eidgenossische Technische Hochschule (ETH, Zurigo)

Einstein, Albert

- costante cosmologica
- principio di equivalenza
- relatività speciale
- spiegazione semplice della relatività
- teoria di gauge di Weyl
- teoria generale della relatività (relatività generale)

elementi

elettricità statica

elettrodinamica quantistica (QED)

- procedura di rinormalizzazione
- relativistica

elettromagnetismo

- convergenza con le forze debole e forte nel MSSM
- equazioni di Maxwell
- gravità e
- necessità di una descrizione in termini di campi quantistici
- paralleli con la forza nucleare debole
- rottura di simmetria
- separazione dalla forza debole dopo il big bang
- *si vedano anche* teoria elettrodebole e elettrodinamica quantistica

elettrone/i

- auto-interazione
- come segnali del decadimento di particelle W-
- coppie di Cooper

- divisione da quark e neutrini
- dualismo onda-particella
- elettronvolt
- fattore g
- massa in rapporto con quella del protone
- misura della carica elettrica
- modello planetario
- momento angolare
- orbite quantizzate
- particelle beta
- principio di esclusione di Pauli
- scambio di fotoni in QED
- scoperta
- *si veda anche* funzione d'onda dell'elettrone

elio

Empedocle

energia oscura

energia

- bilancio nel decadimento beta
- conservazione
- materia e

Englert, François

epoca della grande unificazione

- sovraraffreddamento e transizione all'epoca elettrodebole

epoca elettrodebole

equazioni di Maxwell

esperimento della gocciolina d'olio

ETH, *si veda* Eidgenössische Technische Hochschule

European Physical Society (EPS), conferenza (2011)

Evans, Lyndon

eventi senza muoni

evidenza

- a 3 sigma
- a 5 sigma

Faraday, Michael

Fermi, Enrico

- teoria del decadimento beta

Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab, Chicago)

- Tevatron
 - voci sulla scoperta del bosone di Higgs
- fermioni
- quark come
 - supersimmetria

Feynman, Richard

– elettrodinamica quantistica (QED)

– modello a partoni

Finnegan's Wake (Joyce)

fisica

– delle particelle; *si veda anche* Modello Standard

– dello stato solido

fissione nucleare

Fletcher, Harvey

Fok, Vladimir

fononi

forma e sostanza

forza elettro-nucleare

– convergenza di forze predetta dal $MSSM$

– rottura di simmetria

– teoria di gauge $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

– teoria di grande unificazione

forza nucleare debole

– conservazione della stranezza non rispettata

– convergenza con le forze elettromagnetica e nucleare forte nel $MSSM$

– mediatori, *si vedano* particella W e particella Z

– paralleli con l'elettromagnetismo

– problema della gerarchia

– separazione dalla forza elettromagnetica dopo il big bang

– soluzione del problema della gerarchia

– *si veda anche* teoria elettrodebole

forza nucleare forte (di colore)

– applicazione del meccanismo di Higgs

– colori dei quark

– conservazione dell'isospin

– conservazione della stranezza

– convergenza con le forze elettromagnetica e debole nel $MSSM$

– distinzione dalla forza elettrodebole

– libertà asintotica

– mediatori, *si veda* gluone/i

– modello a scambio di elettroni

– particelle soggette

– produzione di mesoni K e particelle lambda come segnali

– teoria di gauge $SU(2) \times SU(2)$

– teoria di gauge $SU(2)$

– tre particelle mediatrici predette

– *si veda anche* cromodinamica quantistica

fotino

fotone/i

- calorimetri elettromagnetici a ^{LHC}
- canali di decadimento del bosone di Higgs
- come ipotetico mediatore della forza debole
- come mediatore della forza elettromagnetica
- indipendenza dal campo di Higgs e/o dal valore nullo della massa
- polarizzazione

Franklin, Benjamin

Friedman, Jerome

Frisch, Otto

Fritzsch, Harald

- carica di colore dei quark

- cromodinamica quantistica

funzione d'onda dell'elettrone

- compensazione delle variazioni nel campo elettromagnetico

- conservazione della carica elettrica

funzione di struttura

gauge, teoria di

- connessione con la meccanica ondulatoria

Gell-Mann, Murray

- costruzione iniziale dello schema delle particelle

- cromodinamica quantistica (QCD)

- carica di colore dei quark

- stranezza

- modello a quark

- Ottuplice Via

- «pacconi»

- premio Nobel

- previsione della particella omega

Georgi, Howard

- teoria di grande unificazione (^{GUT})

Germania Est

Germania nazista

«getti» di quark

Gianotti, Fabiola

Gillies, James

Gipp, George

Glaser, Donald

Glashow, Sheldon

- premio Nobel

- teoria di campo elettrodebole

- teoria di grande unificazione (^{GUT})

Glashow-Iliopoulos-Maiani (^{GIM}), meccanismo

gluone/i

- carica di colore
- fusione
- «getti»
- massa del nucleone
- modello «a stringa»
- privi di massa

Goldberg, Haim

Goldstone, Jeffrey; *si veda anche* bosoni di Nambu-Goldstone

Goldstone, teorema di

Göttingen, Università di
gravità

- legge di Newton
- relatività generale
- Teorie del Tutto
- unificazione delle forze elettromagnetiche e gravitazionali

Greci

Greenberg, Oscar

Gross, David

gruppi di simmetria (di gauge)

- SU(2)
- SU(3) globale
- SU(3) locale
- SU(5)
- U(1)

guerra arabo-israeliana

Guerra Fredda

Guralnik, Gerald

Guth, Alan

Haganah

Hagen, Carl

Hahn, Otto

Han, Moo-Young

Harvard University

Hawking, Stephen

Heisenberg, Werner

- modello a scambio di elettroni
- principio di indeterminazione

Heuer, Rolf

Higgs, Peter

Hilbert, David

Hiroshima

Hitler, Adolf

Hole in Texas, A (Wouk)

idrogeno

– atomo di spostamento di Lamb (*Lamb shift*)

Iliopoulos, John

Imperial College (Londra)

Incandela, Joseph

indeterminazione posizione-quantità di moto

inflatone

Institute for Advanced Study (Princeton)

International Space Station (Texas)

International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energies (Mumbai, 2011)

isospin

– classificazione secondo l'Ottuplice Via

– composizione in termini di quark

– conservazione

– totale

– «traslato»

isotopi

– radioattivi

Istituto Niels Bohr (Copenhagen)

Istituto sovietico per la ricerca nucleare

Jentschke, Willibald

Jona-Lasinio, Giovanni

Kasper, Raphael

Kendall, Henry

Keplero

Kibble, Tom

Klein, Felix

Konstantinidis, Nikos

Kramers, Hendrik

Lagarrigue, André

Lamb, Willis,

– premio Nobel

Large Electron-Positron Collider (_{LEP})

– rivelatore _{ALEPH}

– rivelatore _{DELPHI}

– rivelatore L3

Large Hadron Collider (_{LHC})

– A Large Ion Collider Experiment (_{ALICE})

– A Toroidal _{LHC} Apparatus (_{atlas})

- accensione (settembre 2008)
- Compact Muon Solenoid (_{cms})
- Large Hadron Collider beauty (_{LHCb})
- Large Hadron Collider forward (_{LHCf})
- problemi (2008)
- ricerca del bosone di Higgs
- ripartenza (novembre 2009)
- risultati in termini di prestazioni
- scoperta del bosone di Higgs
- TOTal Elastic and diffractive cross-section Measurement (_{TOTEM})

laser

Lawrence Radiation Laboratory, California

Lawrence, Ernest

- premio Nobel

Lederman, Leon

- appello a Reagan

- Fermilab e

- l'_{SSC} e

- *Particella di Dio, La*

Legge per il rinnovo dell'amministrazione pubblica (1933)

leggi della natura

leggi di conservazione

- trasformazioni continue di simmetria e

_{LEP}, *si veda* Large Electron-Positron Collider

leptone tau (τ)

- in canali di decadimento del bosone di Higgs

leptoni

- nei canali di decadimento del bosone di Higgs

- teoria unificata elettrodebole

Leucippo

Leutwyler, Heinrich

_{LHC}, *si veda* Large Hadron Collider

libertà asintotica

Lie, Sophus

- gruppi di

litio

London, Fritz

London, Jack

Los Alamos

Low, Francis

luminosità

- dell'_{HLC} al _{CERN}

luminosità integrata

magneti superconduttori

Maiani, Luciano

Major, John

Mann, Alfred

massa

- acquisizione tramite il campo di Higgs
- come resistenza all'accelerazione
- energia e
- gravitazionale
- inerziale
- peso molecolare e
- rottura di simmetria (modello di Nambu-Jona-Lasinio) e

massa fotone-fotone (o gamma-gamma), distribuzione

Massachusetts Institute of Technology (MIT)

materia oscura

materia

- conservazione della (convinzione dei Greci)
- energia e

Max Planck Institute

meccanica ondulatoria

meccanica quantistica

- relativistica

meccanismo di Higgs

- applicato alla teoria elettrodebole
- dibattito sul premio Nobel
- spiegato ai politici

mediatori di forza

- acquisizione di una massa
- *si vedano anche* particella B; fotone; gluone; particella W; particella Z

Meitner, Lise

Mendeleev, Dmitri

mesone eta (η)

mesone J/ψ

mesone phi (φ)

mesone pi-greco (π o pione)

- bosone di Nambu-Goldstone approssimato dal
 - composizione in termini di quark
 - creazione nella diffusione anelastica
 - erroneamente identificati come muoni
 - prodotto nel decadimento del mesone K
 - scoperta
 - tasso di decadimento del pione neutro
- mesone rho (ρ)
- mesone ypsilon (Y)

– rivelato all'LHC

– scoperta

mesoni

– composizione in termini di quark

– con «charm»

– ottetto dell'Ottuplice Via

mesoni K

– comportamento strano

– composizione in termini di quark

– decadimento in muoni

– diagramma alternativo (con il quark charm) per il decadimento

– scoperta

Miller, David

Millikan, Robert

Mills, Robert

MIT-SLAC, gruppo

modello

– a partoni

– a quark; problemi del

– a quark di carica intera di Han-Nambu

– λ -CDM

Modello Solare Standard

Modello Standard

– centralità del campo di Higgs

– concetto di massa

– limiti

– particelle

modello standard della cosmologia del big bang

Modello Standard Supersimmetrico Minimale ($MSSM$)

mole

molecole

momento angolare

– conservazione

– invarianza rispetto a trasformazioni di simmetria rotazionali

monopoli magnetici

muone/i

– cambio di nome rispetto a mesone

– coppie di

– scoperta

Musset, Paul

Nakano, Tadao

Nambu, Yoichiro

– *si veda anche* modello a quark di carica intera di Han-Nambu

National Accelerator Laboratory (NAL, Chicago)

- inaugurazione

- ricerca delle correnti neutre

- *si veda anche* Fermi National Accelerator Laboratory

Ne'eman, Yuval

Neanche sbagliata (Woit)

Neddermeyer, Seth

neutralino

neutrino

- distinto da quark ed elettroni

- nei decadimenti del bosone di Higgs

- scoperta

neutrino dell'elettrone

neutrino muonico

- modalità di decadimento dei mesoni K e

- più veloce della luce

- scoperta

neutrino tau (τ)

- scoperta

neutrone

- acquisto della massa attraverso la rottura di simmetria

- collisioni con neutrini muonici

- composizione in termini di quark

- conversione in protone nel decadimento beta

- instabilità intrinseca

- isotopi

- massa

- modello a scambio di elettrone

- neutroni e peso molecolare

- Ottuplice Via

- proposta della «tripletta fondamentale»

- scoperta

- *si veda anche* forza nucleare forte

«New Scientist»

Newton, Isaac

Nishijima, Kazuhiko

Nishina, Yoshio

Noether, Amalie Emmy

- teorema di

Noether, Max

nucleare, prima reazione artificiale

nucleo atomico; *si veda anche* forza nucleare forte

numero/i

- complessi

- di Avogadro
- immaginari
- quantici

Oak Ridge

«Oh-My-God particle»

«ola» negli stadi

onda di fase

OPERA (esperimento)

Oppenheimer, J. Robert

orbitali atomici

ossigeno

Ottuplice Via

– particelle fondamentali mancanti

Pagels, Heinz

Pais, Abraham

parafermioni

particella B

particella csi (Ξ)

particella Ξ^*

particella lambda (Λ)

– comportamento strano

– Ottuplice Via

– proposta della «tripletta fondamentale»

– scoperta

particella omega (ω)

particella sigma (Σ)

particella Σ^*

particella W

– acquisizione della massa

– canali di decadimento del bosone di Higgs

– decadimenti

– emissione

– «fabbricata» al $_{\text{LEP}}$

– *loop* di bosoni W virtuali

– massa

– prevista

– ricerca

– rivelata all' $_{\text{LHC}}$

– scambio

– scoperta

particella Z

– acquisizione della massa

- canali di decadimento del bosone di Higgs
- correnti deboli neutre e
- «fabbricata» al ^{LEP}
- massa
- prevista
- ricerca
- rivelata all'^{LHC}
- scambio
- scoperta

particelle

- nuovo «zoo»
- schema individuato
- tassonomia
- teoria di grande unificazione
- ultime scoperte
- *si vedano anche* Ottuplice Via; superparticelle; *e le singole particelle*

particelle massive debolmente interagenti (^{WIMP})

Paschos, Emmanuel

Pauli, Wolfgang

- principio di esclusione

Perkins, Donald

Perot, Ross

peso molecolare

«Physical Review Letters»

«Physical Review»

«Physics Letters»

piano complesso

Pikes Peak (Colorado)

pione, *si veda* mesone pi-greco

Planck, massa di,

Platone

- *Timeo*

Pocono Mountains, conferenza (1948)

politica scientifica inglese, cambiamento della

Politzer, David

Ponce, Laurette

positrone

- come segnale del decadimento di una particella W^+
- scoperta

Powell, Cecil

Princeton University

principio di equivalenza

problema della gerarchia

Progetto Manhattan

protone

- acquisizione della massa tramite rottura di simmetria
- caratteristiche degli elementi e
- come parte della «tripletta fondamentale»
- composizione in termini di quark
- conversione del neutrone in p. nel decadimento beta
- costituenti puntiformi
- fissione nucleare e
- instabilità nella GUT di Glashow-Georgi
- massa
- misure di alta precisione
- modello a partoni
- modello a scambio di elettroni
- Ottuplice Via
- peso molecolare
- *si veda anche* forza nucleare forte

quantità di moto, conservazione

Quantum Story, The (Baggott)

quark

- carica di colore
- confinamento
- distinzione da elettroni e neutrini
- evidenza sperimentale
- libertà asintotica
- massa
- meccanismo di cambio di sapore
- modello a carica intera di Han-Nambu
- modello a partoni
- sapore
- «schermatura» della carica di colore
- teoria della forza nucleare forte
- trasformazione in leptoni (proposta)

quark antibottom

quark anticharm

quark bottom

- canali di decadimento dell'Higgs
- coppie b.-antibottom
- massa

quark charm

- coppie c.-anticharm
- proposta
- ricerca
- scoperta

quark down
– massa
quark strange
quark top
– canali di decadimento del bosone di Higgs
– massa
– rivelato all'LHC
– scoperta
quark up
– massa
Quinn, Helen

Rabelais, François
Rabi, Isidor
Radiation Laboratory Berkeley
radioattività
raffreddamento stocastico
raggi cosmici
– particelle ad alta energia
Reagan, Ronald
relatività
– generale
– speciale
– spiegazione semplice da parte di Einstein
Richter, Burton
– premio Nobel
rivelatori di particelle
rivoluzione di novembre
Rockefeller, Fondazione
rottura di simmetria
– acquisizione della massa nel modello di Nambu-Jona-Lasinio
– acquisizione della massa tramite il meccanismo di Higgs
– applicazione alla forza elettrodebole
– applicazione alla forza elettrodebole
– bosoni di Nambu-Goldstone
– epoca di grande unificazione
– separazione tra elettromagnetismo e forza nucleare debole
Royal Institution (Londra)
Rubbia, Carlo
– premio Nobel
– ricerca delle correnti neutre
– ricerca delle particelle W e Z
Rutherford, Ernest

Salam, Abdus
– premio Nobel
– teoria elettrodebole
sapore
satellite ^{COBE} (COsmic Background Explorer)
Schoonschip («nave pulita»)
Schrieffer, John
Schrödinger, Anny
Schrödinger, Erwin
Schwinger, Julian
– elettrodinamica quantistica (^{QED})
– riflessioni sui mediatori della forza debole
Schwitters, Roy
seconda guerra mondiale
Segrè, Emilio
selettroni
Serber, Robert
sfermione
Shelter Island, conferenza (1947)
Shiga, David
simmetria
– di fase
– di gauge locale
– facciale
sincrotrone
– a protoni
^{SLAC}, *si veda* Stanford Linear Accelerator Center
solidi platonici
sovraraffreddamento
spettrometri per muoni
spin dell'elettrone
– appaiati
– up e down
spostamento di Lamb (*Lamb shift*)
spruzzi adronici
squark
Stabler, Ken («Snake»)
Stanford Linear Accelerator Center (^{SLAC})
Stanford Positron Electron Asymmetric Rings (^{SPEAR})
stranezza
– classificazione secondo l'Ottuplice Via
– conservata nelle interazioni forti
– decadimenti delle particelle strane
– scoperta

- valori
- variazione

Strassler, Matt

Strassman, Fritz

Strategic Defence Initiative («Guerre Stellari»), progetto struttura atomica

- modello planetario
- modello quantistico di Bohr

Superconducting SuperCollider (SSC)

- gruppo Gamma, Elettroni e Mu (GEM)
- gruppo Solenoidal Detector Collaboration (SDC)

superconduttori

- teoria BCS

superparticelle

supersimmetria ($SUSY$)

superstringhe

Susskind, Leonard

sviluppo perturbativo

't Hooft, Gerard

tavola periodica

Taylor, Richard

«technicolour» (forza)

Teller, Edward

teoria della grande unificazione (GUT)

teoria elettrodebole ($SU(2) \times U(1)$)

- conferme sperimentali
- dei leptoni
- problema della rinormalizzazione; dimostrata
- problema delle correnti deboli neutre; risolto
- problema delle particelle prive di massa; risolto dall'applicazione del meccanismo di Higgs

teoria quantistica dei campi

- libertà asintotica
- modello di Heisenberg-Pauli
- *si vedano anche* teoria elettrodebole; cromodinamica quantistica; elettrodinamica quantistica; teorie di campo di Yang e Mills

Teorie del Tutto (TOE)

teorie di campo di Yang e Mills

- $SU(2)$
- $SU(2) \times SU(2)$
- $SU(2) \times U(1)$
- $SU(3)$
- $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

– *si veda anche* teoria elettrodebole
terremoti di San Fernando
Tevatron, *si veda* Fermi National Accelerator Laboratory
Thatcher, Margareth
Thomson, Joseph John
Ting, Samuel
– premio Nobel
Tomonaga, Sin-Itiro
Tonelli, Guido
trasformazioni dell'angolo di fase
trasformazioni di simmetria
– continue
– discrete
– globali
– locali
Tye, Henry

uranio
– atomi di bombardamento con neutroni
– uranio

Van der Meer, Simon
– premio Nobel
Van Hove, Leon
Van Vleck, John
velocità della luce
Veltman, Martinus
Very Big Accelerator (VBA); *si veda anche* Superconducting
SuperCollider
Von Neumann, John

Waldegrave, William
Walker, Alan
Waller, Ivar
Walton, Ernest
Ward, John
web, invenzione del
Weinberg, Steven
– premio Nobel
– ricerca delle correnti neutre
– *Sogno dell'unità dell'universo*
– teoria di gauge $SU(2) \times U(1)$ per i leptoni
Weisskopf, Victor
Wess, Julius

Weyl, Hermann
– simmetrie di gauge
Wheeler, John
Wigner, Eugene
Wilczek, Frank
Williamson, Jody
Wilson, Charles
Wilson, Robert
wino
Woit, Peter
Wu, Chieng-Shiung («Madame Wu»)
Wu, Sau Lan

Y-12 (apparato sperimentale in Tennessee)
Yale, Università di
Yang, Chen Ning nn. 8 e 12
Yukawa, Hideki

zino
Zumino, Bruno
Zurigo, Università di
Zweig, George
Zwicky, Fritz